

UNIVERSIDAD DE CUENCA



**FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA ELÉCTRICA**

“ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS, RESPECTO DE LA FUENTE DE ALIMENTACIÓN DE LOS SERVICIOS AUXILIARES DE LA CENTRAL MAZAR”

Tesis previa a la obtención del
Título de Ingeniero Eléctrico

AUTORES:

WILIAN PAÚL ARÉVALO CORDERO
DARÍO JAVIER BENAVIDES PADILLA

DIRECTOR:

ING. MODESTO ENRIQUE SALGADO RODRÍGUEZ

TUTOR:

ING. STALIN ANDRÉS NARVÁEZ MORALES

**CUENCA – ECUADOR
2015**



Resumen

El presente trabajo está orientado al análisis de alternativas respecto de la fuente de alimentación de los Servicios Auxiliares de la central hidroeléctrica Mazar, el cual permitirá establecer los criterios técnicos y de confiabilidad de las alternativas planteadas y por consiguiente se obtendrá la configuración de la fuente de alimentación más idónea en la central. En el *Capítulo 1* se presenta una breve introducción de conceptos básicos acerca del tema, así como la información técnica de la central Mazar. En el *Capítulo 2* se realiza una inspección del funcionamiento actual del sistema de Servicios Auxiliares de la planta, con el fin de diagnosticar el problema que se presenta. El planteamiento de alternativas se realiza en el *Capítulo 3*, donde se analiza la configuración y la lógica de transferencia del sistema de Servicios Auxiliares en diferentes centrales hidroeléctricas, con el objetivo de implantar nuevas ideas y analizar la lógica establecida. En el *Capítulo 4* se establece los casos más idóneos aplicables al sistema y se recomienda un diseño optimizado. Finalmente en el Capítulo 5 se presentan las conclusiones y recomendaciones del estudio.

PALABRAS CLAVE: HIDROELECTRICIDAD, SERVICIOS AUXILIARES, TRANSFERENCIA, SCADA, CONFIABILIDAD.



Abstract

In this paper, we analyze several alternatives regarding the supply of auxiliary services in the hydropower plant Mazar; this will allow to analyze the technical and reliability criteria of the proposed alternatives in order to determine the most appropriate power source in the plant. *Chapter 1* consists of a brief introduction to basic concepts on the subject and technical information about the Mazar hydropower plant. In *Chapter 2* we examine the operation of the auxiliary services system in the power plant, in order to diagnose the problem presented. The alternatives are discussed in *Chapter 3* where both the configuration and the transfer logic of the Auxiliary Services system in some hydroelectric plants are analyzed in order to implement new ideas and study the established logic. *Chapter 4* provides the most suitable cases for the system and recommends an optimized design. Finally, *Chapter 5* presents conclusions and recommendations of the study.

KEYWORDS: HYDROPOWER, AUXILIARY SERVICES, TRANSFER, SCADA, RELIABILITY.



Índice General

Índice de Figuras.....	7
Índice de Tablas	9
CAPÍTULO 1	19
GENERALIDADES	19
1.2 Definiciones	19
1.3 Clasificación de los Servicios Auxiliares	20
1.3.1 Según la tensión de alimentación:.....	21
1.3.1.1 Cargas de los Servicios Auxiliares en C.A.....	21
1.3.1.2 Cargas de los Servicios Auxiliares en C.C.	22
1.3.2 Según el grado de seguridad y fiabilidad en la alimentación:	24
1.4 Transformador de Servicios Auxiliares.	24
1.5 Esquemas de alimentación de los Servicios Auxiliares en corriente alterna.....	25
1.5.1 Utilización del terciario del transformador principal para la alimentación de los S.A.	26
1.5.2 Barra Simple Alimentada directamente desde el generador (alimentación no redundante).....	27
1.5.3 Barra Simple Alimentada directamente desde el transformador de Servicios Auxiliares (alimentación no redundante).....	28
1.5.4 Alimentación doble con enclavamiento, barra partida y grupo electrógeno.	29
1.5.5 Alimentación con doble enclavamiento, doble barra partida y grupo electrógeno.....	30
1.5.6 Esquema con interruptor de generador	32
1.6 Esquemas mediante fuentes de alimentación C.C.	34
1.6.1 Esquema con una batería (BA) y un cargador de batería (CB)	34
1.6.2 Esquema con una batería y dos cargadores de batería.	35
1.6.3 Esquema con dos baterías y dos cargadores de batería.	36
1.7 Central Hidroeléctrica Mazar	38
1.7.1 Antecedentes	38
1.7.2 Información técnica de la Central Mazar	38



CAPÍTULO 2	54
ANÁLISIS DEL ENTORNO	54
2.1 Criterios de diseño, Servicios Auxiliares de corriente alterna de la central Mazar.	54
2.1.1 Normas técnicas vigentes para el diseño	54
2.1.2 Criterios de diseño	55
2.2 Descripción del Centro de Fuerza	55
2.3 Distribución primaria del Centro de Fuerza	58
2.4 Distribución secundaria del Centro de Fuerza	58
2.5 Descripción del sistema de S.A. de Corriente Continua	60
2.6 Potencia requerida por los Servicios Auxiliares de la central	61
2.7 Lógica de transferencia de fuentes para los Servicios Auxiliares	62
2.7.1 Transferencia automática de fuentes	62
2.8 Interrupciones debido a transferencias automáticas de fuentes en el Centro de Fuerza TDSM.	64
2.9 Análisis del impacto de las transferencias	66
2.10 Análisis del retardo de tiempo en transferencias a nivel de 13,8kV	71
CAPÍTULO 3	73
PLANTEAMIENTO DE ALTERNATIVAS	73
3.1 Introducción	73
3.2 Sistemas de transferencia utilizados convencionalmente	73
3.2.1 Auto-alimentación para cargas esenciales	73
3.2.3 Interruptor de Unidad	79
3.2.4 Interruptor de Unidad central Mazar	84
3.2.5 Alimentación directa desde otra central	86
3.2.6 Alimentación directa hacia la central Mazar desde la central Molino	86
CAPÍTULO 4	89
ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS	89
4.1 Introducción	89
4.2 Alternativa N° 1 - Alimentación desde otra central	89
4.2.1 Levantamiento de parámetros	89
4.2.2 Cálculo de caída de tensión	93
4.2.3 Cambio de lógica de transferencia del SCADA	96
4.2.4 Estudio de confiabilidad	100



4.2.5 Flujo de Potencia Alternativa 1	110
4.3 Alternativa N°2 Auto - alimentación para cargas esenciales.....	111
4.3.1 Cambio de la topología de los S.A.	112
4.3.2 Cambio de lógica de alimentación SCADA.....	114
4.3.3 Estudio de confiabilidad del sistema	115
4.3.4 Flujo de Potencia Alternativa 2	117
4.3.5 Calculo de corrientes de cortocircuito.....	117
CAPÍTULO 5.....	121
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	121
Conclusiones.....	121
Recomendaciones	123
BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS:	125
ANEXOS:	
ANEXO 1 - CENTRO DE FUERZA MAZAR.....	129
ANEXO 2 - UNIFILAR MAZAR.....	130
ANEXO 3 - UNIFILAR MAZAR C. CONTINUA.....	131
ANEXO 4 - LÓGICA DE TRANSFERENCIA.....	132
ANEXO 5 - ANALISIS DEL RETARDO EN TRANSFERENCIAS.....	146
ANEXO 6 - DIAGRAMAS LÓGICOS.....	149
ANEXO 7 - CENTRO DE FUERZA MOLINO.....	153
ANEXO 8 - MAZAR ALT-1.....	154
ANEXO 9 - CENTRO DE FUERZA SOPLADORA.....	155
ANEXO 10 - MAZAR ALT-2.....	156
ANEXO 11 - MAZAR ALT-3.....	157
ANEXO 12 - UNIFILAR MAZAR ALT 1.....	158
ANEXO 13 - MOLINO PRESA.....	159
ANEXO 14 - CONFIABILIDAD DEL SISTEMA.....	160
ANEXO 15 - FP MAZAR.....	165
ANEXO 16 - FP MAZAR ALT1.....	166
ANEXO 17 - UNIFILAR MAZAR ALT 2.....	167



ANEXO 18 - DIAGRAMAS LOGICOS ALT2.....	168
ANEXO 19 - CC TRIFASICO MAZAR.....	172
ANEXO 20 - CC FASE TIERRA MAZAR.....	173
ANEXO 21 - CC TRIFASICO MAZAR ALT2.....	174
ANEXO 22 - CC FASE TIERRA MAZAR ALT2.....	175

Índice de Figuras

Figuras:

Figura 1: Ejemplo de fuente de alimentación de transformadores para S.A.	25
Figura 2: Alimentación desde el terciario del transformador principal para S.A.	27
Figura 3: Alimentación de barra simple, directamente del generador	28
Figura 4: Alimentación de barra simple, desde el transformador de S.A.....	29
Figura 5: Alimentación con doble enclavamiento, barra partida y grupo electrógeno ..	30
Figura 6: Alimentación con doble enclavamiento, doble barra partida y grupo electrógeno.....	31
Figura 7: Los circuitos prioritarios y los no prioritarios están separados y existen fuentes auxiliares automáticas para los circuitos prioritarios	32
Figura 8: Sistema con interruptor de generador	33
Figura 9: Sistema de unidades en bloque.....	34
Figura 10: Sistema con una batería y un cargador.....	35
Figura 11: Sistema con una batería y dos cargadores	35
Figura 12: Sistema con dos baterías y dos cargadores.....	36
Figura 13: Conexión de baterías	37
Figura 14: Turbina Francis eje vertical	40
Figura 15: Generador y turbina en casa de máquinas.....	40
Figura 16: Unifilar simplificado de cargas de los S.A.	61
Figura 17: Nivel de tensión en condiciones normales de operación medido en el CB168	
Figura 18: Picos de tensión durante una transferencia con un alto valor de dvdt medido en el INVS13.....	69
Figura 19: Picos de tensión durante una transferencia con un alto valor de dvdt medido en el CB1	69
Figura 20: Picos de tensión durante la quinta transferencia con un alto valor de dvdt medido en el CB1.....	70
Figura 21: Centro de fuerza de la central Molino	74
Figura 22: Centro de fuerza de casa de máquinas de la central Molino	75
Figura 23: Cargas no esenciales conectadas al centro de fuerza	76
Figura 24: Auto-alimentación de cargas esenciales.....	77
Figura 25: Sistema con interruptor de unidad	80



Figura 26: Centro de fuerza Sopladora 13,8kV	81
Figura 27: Alimentación desde sus propias unidades y del sistema	82
Figura 28: Regulación de tensión en LTM1 y LTM2.....	88
Figura 29: Sistema Molino-Presa-Mazar.....	91
Figura 30: Disposición Geométrica Estructura AR.	92
Figura 31: Circuito equivalente de una línea corta.	94
Figura 32: Diagrama vectorial.....	94
Figura 33: Orden secuencial de diagramas lógicos.	97
Figura 34: Diagrama lógico para la apertura del interruptor 52-LTM1	98
Figura 35: Diagrama lógico para la apertura del interruptor 52-LTM2	98
Figura 36: Diagrama lógico modificado para la apertura del interruptor 52-LTM1	99
Figura 37: Diagrama lógico modificado para la apertura del interruptor 52-LTM2	99
Figura 38: Tasa de fallas de un componente o sistema	101
Figura 39: Alimentación actual de los tableros de CCMU1 y CCMU2	113
Figura 40: Unifilar Mazar modificado para alternativa 2	114

Esquemas:

Esquema 1: Casa de máquinas.....	41
Esquema 2: Casa de máquinas y Cámara de Transformación	42
Esquema 3: Embalse 410 Hm ³	46
Esquema 4: Embalse Mazar (31 km).....	46
Esquema 5: Embalse de Mazar.....	47
Esquema 6: Características de los túneles.....	48
Esquema 7: Tubería forzada.....	50
Esquema 8: Implantación general.....	53

Fotografías:

Fotografía 1: Casa de máquinas de la central Mazar	39
Fotografía 2: Transformador elevador 100 MVA 13,8/230 kV	42
Fotografía 3: Subestación de la central Mazar	43
Fotografía 4: Presa de Mazar	45
Fotografía 5: Desagüe de fondo de la central Mazar.....	49
Fotografía 6: Generador diésel de emergencia 1MVA	57
Fotografía 7: Equipos averiados en bodega	71
Fotografía 8: Inversor y cargador de batería averiados.....	71



Índice de Tablas

Tabla Nº 1: Características de Casa de Máquinas	38
Tabla Nº 2: Características del Generador.....	39
Tabla Nº 3 : Características de las Turbinas.....	39
Tabla Nº 4: Características de los Transformadores	41
Tabla Nº 5: Características de la S/E GIS.....	43
Tabla Nº 6: Características de la presa	43
Tabla Nº 7: Características del embalse.....	45
Tabla Nº 8: Características de los vertederos	47
Tabla Nº 9: Características del desagüe de fondo.....	48
Tabla Nº 10: Características del túnel de carga	49
Tabla Nº 11: Características de la tubería forzada	50
Tabla Nº 12: Características del túnel de equilibrio	51
Tabla Nº 13: Características del túnel de descarga.....	52
Tabla Nº 14: Características del pozo de transporte, cables y ascensor	52
Tabla Nº 15: Medición de cargas de los S.A. de la Central.....	62
Tabla Nº 16: Modos de operación	63
Tabla Nº 17: Línea de interconexión Molino – Presa Daniel Palacios.....	89
Tabla Nº 18: Línea de interconexión desde la barra Presa Daniel Palacios - Mazar ...	90
Tabla Nº 19: Mediciones en el Centro de fuerza de Mazar.	93
Tabla Nº 20: Periodos de evolución de la curva.....	101
Tabla Nº 21: Línea presa 1	105
Tabla Nº 22: Línea presa 2	105
Tabla Nº 23: Estados del sistema.....	106
Tabla Nº 24: Capacidades desconectadas línea presa 1 y 2.....	106
Tabla Nº 25: Probabilidad de fallo del sistema de transmisión Molino-Presa	106
Tabla Nº 26: Línea Molino 1	107
Tabla Nº 27: Línea Molino 2	107
Tabla Nº 28: Capacidades desconectadas línea Molino 1 y 2.....	107
Tabla Nº 29: Probabilidad de fallo del sistema de transmisión Presa-Mazar	107
Tabla Nº 30: Índices de confiabilidad del transformador AT1	108
Tabla Nº 31: Índices de confiabilidad del transformador AT2	108
Tabla Nº 32: Probabilidad de fallo del sistema de transmisión AT1 y AT2	108
Tabla Nº 33: Índices de confiabilidad de la barra J.....	108
Tabla Nº 34: Índices de confiabilidad de la barra K.....	108
Tabla Nº 35: Capacidades desconectadas barras J y K.....	109
Tabla Nº 36: Probabilidad de fallo de las barras J y K.....	109



Universidad de Cuenca
Clausula de derechos de autor

Yo, WILIAN PAÚL ARÉVALO CORDERO autor de la tesis "ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS, RESPECTO DE LA FUENTE DE ALIMENTACIÓN DE LOS SERVICIOS AUXILIARES DE LA CENTRAL MAZAR", reconozco y acepto el derecho de la Universidad de Cuenca, en base al Art. 5 literal c) de su Reglamento de Propiedad Intelectual, de publicar este trabajo por cualquier medio conocido o por conocer, al ser este requisito para la obtención de mi título de INGENIERO ELÉCTRICO. El uso que la Universidad de Cuenca hiciere de este trabajo, no implicará afección alguna de mis derechos morales o patrimoniales como autor.

Cuenca, febrero de 2015

WILIAN PAÚL ARÉVALO CORDERO

0302495726



Universidad de Cuenca
Clausula de derechos de autor

Yo, DARÍO JAVIER BENAVIDES PADILLA autor de la tesis "ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS, RESPECTO DE LA FUENTE DE ALIMENTACIÓN DE LOS SERVICIOS AUXILIARES DE LA CENTRAL MAZAR", reconozco y acepto el derecho de la Universidad de Cuenca, en base al Art. 5 literal c) de su Reglamento de Propiedad Intelectual, de publicar este trabajo por cualquier medio conocido o por conocer, al ser este requisito para la obtención de mi título de INGENIERO ELÉCTRICO. El uso que la Universidad de Cuenca hiciere de este trabajo, no implicará afección alguna de mis derechos morales o patrimoniales como autor.

Cuenca, febrero de 2015

DARÍO JAVIER BENAVIDES PADILLA

0105160345



Universidad de Cuenca
Clausula de propiedad intelectual

Yo, WILIAN PAÚL ARÉVALO CORDERO, autor de la tesis "ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS, RESPECTO DE LA FUENTE DE ALIMENTACIÓN DE LOS SERVICIOS AUXILIARES DE LA CENTRAL MAZAR", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

Cuenca, febrero de 2015

WILIAN PAÚL ARÉVALO CORDERO

0302495726



Universidad de Cuenca
Clausula de propiedad intelectual

Yo, DARÍO JAVIER BENAVIDES PADILLA, autor de la tesis "ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS, RESPECTO DE LA FUENTE DE ALIMENTACIÓN DE LOS SERVICIOS AUXILIARES DE LA CENTRAL MAZAR", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

Cuenca, febrero de 2015

DARÍO JAVIER BENAVIDES PADILLA

0105160345



Certifico que el trabajo de tesis "ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS, RESPECTO DE LA FUENTE DE ALIMENTACIÓN DE LOS SERVICIOS AUXILIARES DE LA CENTRAL MAZAR" realizado por los señores estudiantes: WILIAM PAÚL ARÉVALO CORDERO con C.I. 0302495726, DARÍO JAVIER BENAVIDES PADILLA con C.I. 0105160345, ha sido concluido.

Cuenca, marzo de 2015

MODESTO SALGADO RODRIGUEZ

DIRECTOR DE TESIS

STALIN NARVÁEZ MORALES

TUTOR DE TESIS



Dedicatoria

A mi familia que gracias a sus consejos y palabras de aliento crecí como persona. A mis padres y hermanos por su apoyo y confianza. Gracias por ayudarme a cumplir mis objetivos como persona y estudiante. A mi madre por brindarme los recursos necesarios y estar siempre a mi lado apoyándome y aconsejándome. A mi padre por hacer de mí una mejor persona mediante sus consejos y enseñanzas, a mi novia por apoyarme de manera incondicional en los últimos años de mi carrera, a mis maestros y amigos.

Paúl Arévalo

A mis padres, por sus sabios consejos, por ser mi apoyo incondicional a lo largo de la vida y modelo a seguir, a mis hermanos porque siempre puedo contar con ellos en todo momento, a mi novia por estar siempre presente en momentos buenos y malos, de igual manera a mis familiares, amigos, profesores y a todos quienes me apoyaron hacia la culminación de mis estudios y este logro obtenido, gracias por creer en mí.

Javier Benavides



Agradecimientos

Agradecemos en primer lugar a Dios por darnos la vida, por guiarnos y siempre estar con nosotros.

Al Ing. Modesto Salgado por su apoyo, colaboración y confianza como director de nuestra tesis. De manera muy especial a nuestro tutor el Ing. Stalin Narváez por toda su confianza, disponibilidad y paciencia, que ha sido un apoyo primordial en este trabajo.

Al Ing. Juan Chávez por abrirnos las puertas y permitirnos aplicar nuestros conocimientos en esta investigación y a todo el personal de la empresa CELEC, por su acogida y colaboración en el desarrollo de nuestra tesis.

A nuestros profesores por brindarnos su sabiduría, consejos y experiencia en nuestra formación profesional.

A nuestros amigos por sus consejos, solidaridad y momentos vividos durante esta etapa de nuestra vida.



Glosario

LTM - Línea de Transmisión Molino.

TSA - Transformador de Servicios Auxiliares.

TPR - Transformador para la alimentación zona de Presa.

TAG - Transformador de Aislamiento Galvánico.

TES - Transformador de alimentación del Edificio de Servicios.

GED - Generador de Emergencia Diésel.

TDSM - Tablero de Distribución de Servicios Auxiliares de Media Tensión.

TDCM - Tablero principal de Distribución Servicios Auxiliares de la Casa de Máquinas.

TDCGCM - Tablero de Distribución de Cargas Generales de la Casa de Máquinas.

TDTA - Tablero de Distribución de Servicios Auxiliares CA de la cámara de la Compuerta.

TDPS - Tablero de Distribución de Servicios Auxiliares CA en el área de la Presa.

TDCCP1 - Tablero de Distribución Principal 1 de Servicios Auxiliares 125 Vcc.

TDCCP2 - Tablero de Distribución Principal 2 de Servicios Auxiliares 125 Vcc.

TDCCG1 - Tablero de Distribución General 1 de Servicios Auxiliares 125 Vcc.

TDCCG2 - Tablero de Distribución General 2 de Servicios Auxiliares 125 Vcc.

TDCCU1 - Tablero de Distribución 1 de Servicios Auxiliares 125 Vcc de las Unidades.

TDCCU2 - Tablero de Distribución 2 de Servicios Auxiliares 125 Vcc de las Unidades.



TDSI - Tablero de Distribución 127 Vca de la Sala de Telecomunicaciones.

TFACA - Sistema de Energía Ininterrumpida Fuente Alternativa CA.

CCMU1 - Centro de Carga de Motores de la Unidad 1.

CCMU2 - Centro de Carga de Motores de la Unidad 2.

CCMVAC - Centro de Cargas de Motores de Ventilación y Aire Acondicionado.

CCMDD - Centro de Cargas de Motores de Desagüe y Drenaje.

INVS - Inversor de Frecuencia CC/CA de la Casa de Máquinas.

SCADA - Supervisión, Control y Adquisición de Datos.

CB - Cargador de Batería de 125 Vcc.

CIP – Cubículo del Interruptor Principal

SNI – Sistema Nacional Interconectado.

CA - Corriente Alterna

CC – Corriente Continua



“ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS, RESPECTO DE LA FUENTE DE ALIMENTACIÓN DE LOS SERVICIOS AUXILIARES DE LA CENTRAL MAZAR”

CAPÍTULO 1

GENERALIDADES

Los Servicios Auxiliares de una central hidroeléctrica están constituidos fundamentalmente por los elementos que, sin intervenir directamente en la producción de energía eléctrica, son necesarios e incluso indispensables en este proceso, junto con sus fuentes de alimentación y sistemas de distribución asociados [1].

Es por ello que el enfoque se realizará en este tipo de sistemas y se analizará principalmente el sistema de transferencia, para garantizar la fiabilidad y continuidad del servicio. También se mencionan diferentes esquemas de configuración de los Servicios Auxiliares comúnmente utilizados en algunas centrales.

1.2 Definiciones

Las definiciones de los Servicios Auxiliares (S.A.) no son idénticas por completo en diferentes países. Los Servicios Auxiliares de alimentación incluyen: el Control de la Generación Automática (AGC), también conocido como control de frecuencia activa; la reserva operacional; reserva de reemplazo; reactiva y tensión de servicio. *Fuente: Huang Yonghao. “An Operation Mechanism and Model of Ancillary Service Market”, Automation of Electric Power Systems, vol.27, no.2, Jan 25. 2003, pp.33-35*



Para la NERC, la palabra Servicios Auxiliares los llama *Servicios de Operaciones Interconectados* (SOI). "Los Servicios Auxiliares son los servicios requeridos que permiten a las áreas de control y entidades de compra-venta operar confiablemente en las interconexiones" [2].

Los Servicios Auxiliares en centrales hidroeléctricas están destinados a establecer y mantener las condiciones normales de operatividad y servicio que aseguren el correcto funcionamiento de las instalaciones o sistemas primarios [10].

De manera general podemos decir que los Servicios Auxiliares son sistemas secundarios de vital importancia dentro de una central hidroeléctrica. Aunque no son considerados como primarios debido a sus funciones de operación, son esenciales para los sistemas primarios como por ejemplo: bombas, ventiladores de enfriamiento, sistemas de control etc.

Según la experiencia en gran número de centrales en operación, la capacidad del transformador que alimenta los Servicios Auxiliares localizados en el interior de la casa de máquinas, representa aproximadamente el 0.2% de la capacidad total de la planta [4].

1.3 Clasificación de los Servicios Auxiliares

Forman parte de un sistema de Servicios Auxiliares todos los dispositivos correspondientes a:

- Protección de los circuitos.
- Automatismos para la transferencia de los equipos y alimentaciones redundantes.
- Señalización y medición del sistema.



Los Servicios Auxiliares se clasifican según dos aspectos:

- Según la tensión de alimentación:
 - Servicios alimentados en corriente continua.
 - Servicios alimentados en corriente alterna.
- Según el grado de seguridad y fiabilidad en la alimentación:
 - Servicios Auxiliares esenciales
 - Servicios Auxiliares seguros o principales
 - Servicios Auxiliares normales

1.3.1 Según la tensión de alimentación:

1.3.1.1 Cargas de los Servicios Auxiliares en C.A.

Por lo general para alimentar a Servicios Auxiliares en corriente alterna se utilizan transformadores cuyo nivel de tensión en el primario es de 13800 voltios, lo que corresponde al nivel de tensión de los alternadores de la central, en el secundario por lo general se consigue niveles de tensión de 480, 440, 380, 220, 208, 127 o 110 voltios.

En la mayoría de casos se utiliza motores de corriente alterna y no de corriente continua debido a su menor costo, simplicidad y rendimiento. Por ejemplo los Servicios Auxiliares de unidad son esenciales para el arranque, marcha y parada de la unidad generadora. En una central la mayoría de Servicios Auxiliares son en corriente alterna, entre los equipos conectados a los barrajes para los Servicios Auxiliares de unidad (480V) están:

- Sistema de aire comprimido.
- Sistema de aire acondicionado.
- Bomba de agua para el enfriamiento de la unidad.



- Calefactores de la unidad.
- Bomba de aceite del regulador de velocidad.
- Bombas de aceite para los cojinetes de guía y empuje.
- Ventiladores de enfriamiento para el equipo de excitación.
- Ventiladores de enfriamiento para los transformadores.
- Control de motores y Servicios Auxiliares generales.
- Ventilación e iluminación de la casa de máquinas.
- Compresores de aire para los interruptores de máquina y para el acumulador aire aceite del regulador de velocidad.
- Alimentación para las herramientas del taller (mantenimiento).
- Puente grúa.
- Tableros de control para las máquinas.
- Iluminación de emergencia.
- Servicios Auxiliares del patio de la subestación.
- Motores para la operación de interruptores y seccionadores.
- Tomas e iluminación del kiosco de relés.
- Calefacción de los interruptores y seccionadores [4].

1.3.1.2 Cargas de los Servicios Auxiliares en C.C.

El sistema de Servicios Auxiliares de corriente continua, se compone de un cargador, un banco de baterías, y tableros de distribución.

Cargador de baterías.

El cargador de baterías debe tener una potencia capaz de suministrar la demanda requerida por todos los equipos de corriente continua de casa de máquinas, teniendo en cuenta que toda carga cuya duración sea mayor o igual a un minuto se considera permanente.



Por lo general este tipo de alimentación se lo hace directamente desde una barra de corriente alterna y un rectificador, de manera que se mantenga el suministro de energía durante el mayor tiempo.

Banco de baterías.

El banco de baterías se dimensionará para una autonomía mínima de 10 horas, sin que sufra deterioro su nivel de tensión, esto significa que en caso de falla del cargador, abastecerá toda la carga durante 10 horas [4].

Este equipo se utiliza mayormente en sistemas auxiliares esenciales, ya que no pueden perder su fuente de alimentación. El número de baterías a ser instaladas y el tipo de conexión dependen de la capacidad de la potencia que requiera la carga y de la confiabilidad de la misma. En el caso de alimentar a cargas de corriente alterna desde el banco de baterías, se utiliza un inversor.

Tableros de distribución. Sirven para distribuir la alimentación para las cargas de corriente continua. Entre ellas las más relevantes son:

- Sistema de control.
- Sistema de protección.
- Inversores para los sistemas de comunicación.
- Alumbrado de emergencia.
- Circuitos de disparo de los interruptores.
- Motores de carga de resortes almacenadores de energía de interruptores.
- Bombas, en determinado tipo de diseño.
- Sistema de señalización y alarmas.

En caso que se presente un cortocircuito o una falla en alguno de los circuitos ya mencionados, ésta no deberá afectar el normal desempeño de los otros,



debido a que la conexión de cada circuito se la realiza de manera independiente.

1.3.2 Según el grado de seguridad y fiabilidad en la alimentación:

Servicios Auxiliares esenciales

Forman parte de este grupo aquellos servicios que deben estar siempre disponibles, sin sufrir perturbaciones por defectos o maniobras incorrectas. Generalmente se consideran todos aquellos elementos que ante la existencia de un fallo o la activación de una protección aseguren la desconexión controlada y segura de la instalación.

Servicios seguros o principales

Los Servicios Auxiliares seguros o principales son aquellos que pueden permitir una falta de alimentación de corta duración, dando lugar a graves perturbaciones de funcionamiento si esta perdura.

Servicios normales

Están formados por aquellos que pueden quedar sin alimentación durante un periodo prolongado de tiempo sin que el funcionamiento de la central quede comprometido, por lo que el fallo en algunos de estos sistemas únicamente origina la señalización correspondiente y no el paro de la central.

1.4 Transformador de Servicios Auxiliares.

Todos los elementos definidos en la sección anterior por lo general se alimentan a través del denominado *Transformador de Servicios Auxiliares (TSA)*.

Las características nominales de estos transformadores quedan supeditadas a la carga que deben alimentar. Estos transformadores suelen ir conectados a las barras de media tensión de la central, para reducir a tensiones factibles hacia los equipos auxiliares (480V, 220V, 127V).

Para estimar la potencia nominal del transformador pueden seguirse estos pasos:

- Calcular el consumo de todos los aparatos y equipos conectados a los cuadros de los Servicios Auxiliares.
- Estimar el factor de simultaneidad en función de las condiciones normales del sistema.
- Aplicar un factor de seguridad adecuado para prever futuras aplicaciones.

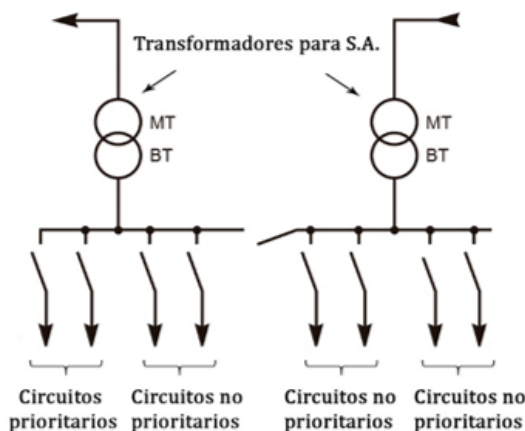


Figura 1: Ejemplo de fuente de alimentación de transformadores para S.A.

Fuente: Guía de diseño de instalaciones eléctricas- Schneider Electric

1.5 Esquemas de alimentación de los Servicios Auxiliares en corriente alterna

Debido al carácter imprescindible que tienen los Servicios Auxiliares para el funcionamiento de una central. La selección de la configuración para los



Servicios Auxiliares eléctricos de una central debe estar fundamentada en tres criterios principales: [4]

- Técnicamente realizable.
- Económicamente factible.
- Alta confiabilidad.

La creación de circuitos independientes para diferentes partes de una instalación permite:

- Limitar las consecuencias de un defecto en el circuito en cuestión.
- Simplificar la localización de defectos.
- Llevar a cabo trabajo de mantenimiento o extensiones de los circuitos sin interrumpir el suministro de alimentación a toda la instalación.

1.5.1 Utilización del terciario del transformador principal para la alimentación de los S.A.

En algunas centrales de generación se utiliza el terciario de los transformadores de potencia como fuente para alimentar a los dispositivos auxiliares, siempre y cuando la capacidad del terciario sea capaz de suplir la demanda de los sistemas auxiliares. Por lo general se designa al tercer devanado como de baja tensión con respecto al primario y al secundario. Como se muestra a continuación.

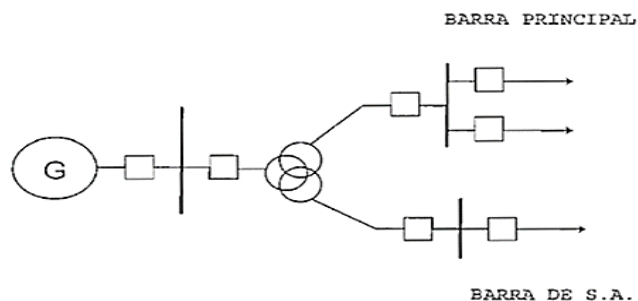


Figura 2: Alimentación desde el terciario del transformador principal para S.A.

Fuente: Selección y protección de esquema de barras en subestaciones-Terán Edmundo. Tesis de Grado-E.P.N.-1978

Una ventaja de este tipo de conexión es la baja inversión, debido a que se aprovecha el transformador de potencia como fuente de alimentación para los Servicios Auxiliares y por otro lado una gran desventaja, es la pérdida del transformador por mantenimiento o por salida forzada lo cual dejaría a estas cargas sin energía, es por eso que debe aumentarse la confiabilidad del sistema para evitar este tipo de problemas [6].

El tamaño del bobinado del terciario del transformador de potencia se construye con un 35% del tamaño del mayor de los bobinados, debido a que una falla fase-neutro con el secundario, sometería al terciario a $1/3$ de la potencia en KVA del secundario, debido a esto los terciarios empleados para alimentar transformadores de Servicios Auxiliares tendrán una potencia menor a las $2/3$ partes de la potencia nominal del transformador y un nivel de voltaje requerido [7].

1.5.2 Barra Simple Alimentada directamente desde el generador (alimentación no redundante)

Usada habitualmente en instalaciones con poca potencia, se consigue ahorrar el transformador de Servicios Auxiliares.

En caso de fallar en generador el transformador principal de potencia alimenta a los Servicios Auxiliares, como se ilustra a continuación una alimentación de barra simple directamente desde el generador.

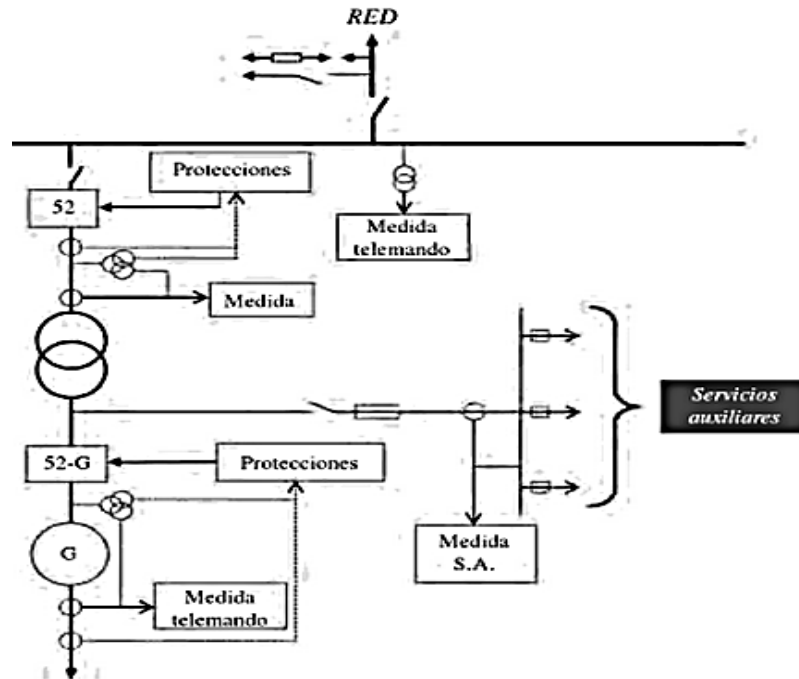


Figura 3: Alimentación de barra simple, directamente del generador

Fuente: Energía Hidroeléctrica - José Francisco Sanz Osorio – Prensas Universitarias de Zaragoza, 2008

1.5.3 Barra Simple Alimentada directamente desde el transformador de Servicios Auxiliares (alimentación no redundante)

Esta es la configuración más habitual, el transformador de S.A. se conecta a las barras propias de la central.

A continuación se muestra la configuración con alimentación no redundante de barra simple conectada desde el transformador de Servicios Auxiliares, a 380V en su secundario, si esta fuente sufre alguna avería o entra en mantenimiento, no existe otra alimentación por la cual se logre alimentar a los auxiliares, los mismos que a falta de su única fuente de energía eléctrica, permanecerían sin suministro.



1.5.4 Alimentación doble con enclavamiento, barra partida y grupo electrógeno.

En este tipo de configuración lo que normalmente se hace es separar las cargas en esenciales y normales. En caso de falla simultánea de los transformadores de Servicios Auxiliares, entraría en funcionamiento el generador de emergencia para alimentar cargas esenciales y mediante interruptor 52-A desconectar cargas normales.

En la figura 5 podemos observar la configuración con doble enclavamiento, barra partida y grupo electrógeno, la misma que al tener dos fuentes de

alimentación para los cargas esenciales aumenta la confiabilidad de manera considerable.

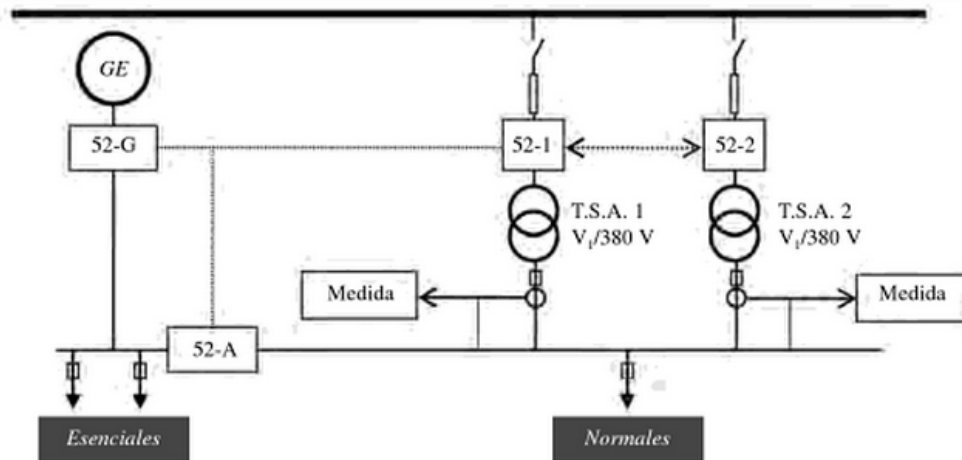


Figura 5: Alimentación con doble enclavamiento, barra partida y grupo electrógeno

Fuente: Energía Hidroeléctrica - José Francisco Sanz Osorio – Prensas Universitarias de Zaragoza, 2008

1.5.5 Alimentación con doble enclavamiento, doble barra partida y grupo electrógeno.

A continuación se presenta otro tipo de configuración, se tiene una alimentación con doble enclavamiento, doble barra partida y grupo electrógeno. En este caso al agregar doble barra se incrementa la confiabilidad y una mayor flexibilidad en el sistema.

Como podemos observar en la siguiente figura, a diferencia de la configuración con simple barra partida, ahora se sub-dividen los S.A. normales en dos grupos, cada uno conectado con su transformador de Servicios Auxiliares mediante el interruptor 52-1 y 52-2.

Los Servicios Auxiliares esenciales se conectan de tal manera que la confiabilidad sea aprovechada al máximo, en caso de presentarse una falla en uno de los transformadores de Servicios Auxiliares, la energía requerida se tomará de la fuente que esté operando correctamente, maniobrando los interruptores 52-A1 o 52-A2.

En caso extremo que se produzca una falla simultánea de los dos transformadores TSA1 y TSA2, entrará el Generador de Emergencia (GE) para abastecer la carga necesaria.

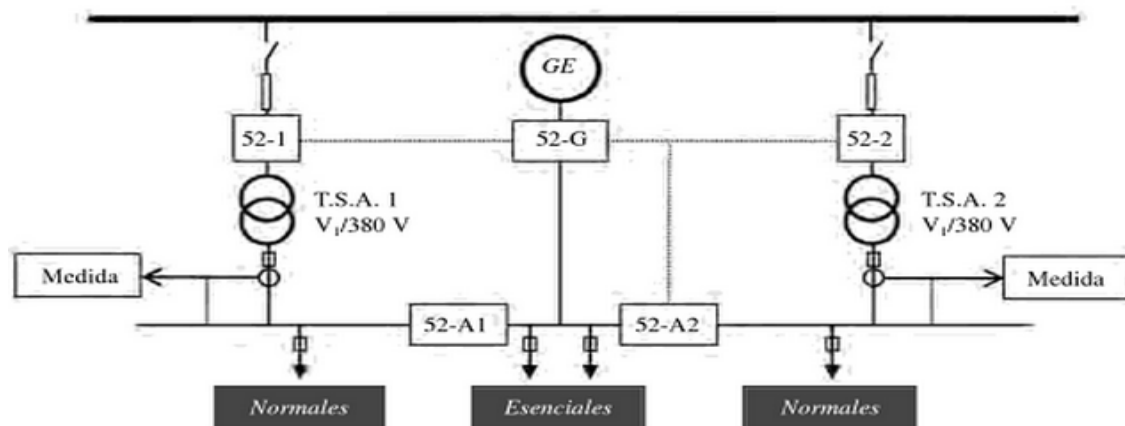


Figura 6: Alimentación con doble enclavamiento, doble barra partida y grupo electrógeno

Fuente: Energía Hidroeléctrica - José Francisco Sanz Osorio – Prensas Universitarias de Zaragoza, 2008

A continuación en la fig. 7, observamos de manera más detallada la distribución entre circuitos prioritarios y no prioritarios, en este caso se tiene una fuente de alimentación adicional al generador de emergencia y al transformador de Servicios Auxiliares. El uso de un UPS (Uninterruptible Power Supply) hace más confiable a cargas relativamente pequeñas como ordenadores y a cargas que no pueden quedar sin suministro eléctrico.

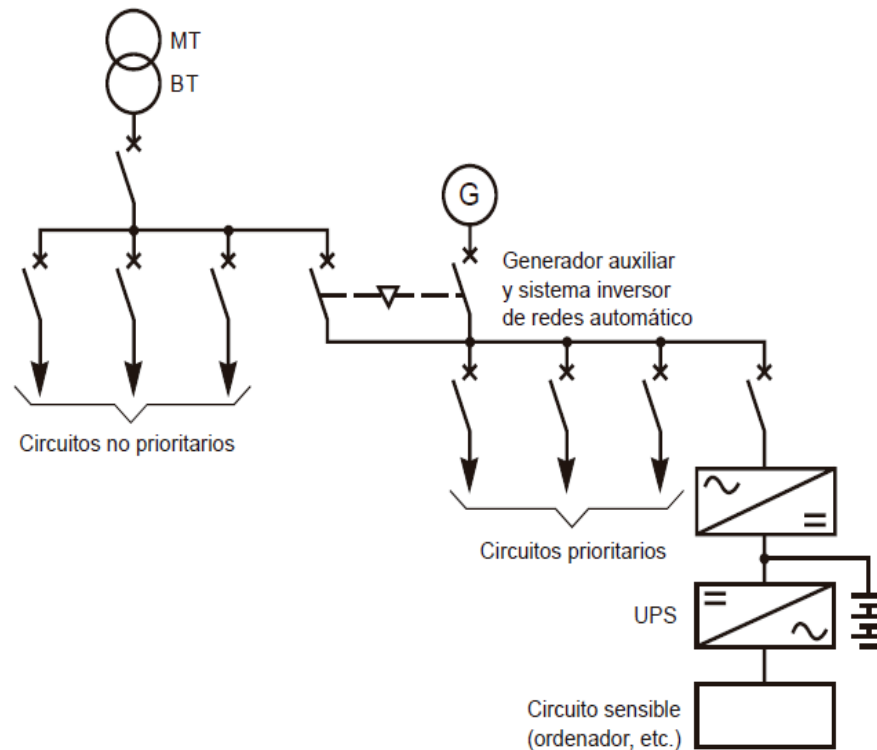


Figura 7: Circuitos prioritarios y no prioritarios separados con fuentes auxiliares automáticas para los circuitos prioritarios

Fuente: Guía de diseño de instalaciones eléctricas- Schneider Electric

1.5.6 Esquema con interruptor de generador

Para poder abastecer los Servicios Auxiliares de una central con sus unidades, es necesario saber si existen en el mercado interruptores adecuados y a un costo lo suficientemente factible que justifique ventajas de su empleo como interruptor de generador, dado el nivel de corrientes de generación previstas.

Cuando una central de energía eléctrica se encuentra en lugares geográficamente alejados de cualquier fuente de alimentación que se considere confiable para su sistema de Servicios Auxiliares, lo que habitualmente resulta más económico es utilizar el esquema con interruptor generador mostrado en la

fig. 8, la cual también nos indica que el Generador de Emergencia (GE) se encuentra conectado a través de un transformador TGE hasta la barra de MT.

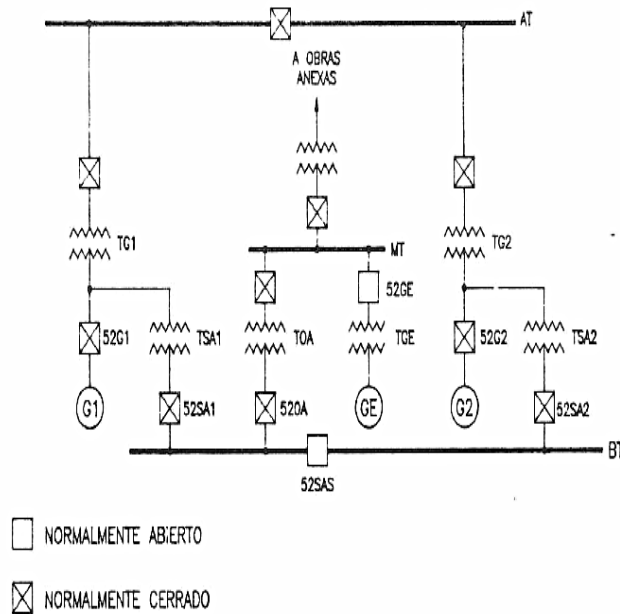


Figura 8: Sistema con interruptor de generador

Fuente: Mantenimiento de Servicios Auxiliares de una Central Hidroeléctrica – Hernández Reyes Pedro Luis

Además el esquema con interruptor de generador tiene la gran ventaja de eliminar todas las transferencias frecuentes de fuentes de alimentación, que se las realiza con el esquema de la fig. 9, cada vez que entra en servicios o se detiene cada unidad generadora.

Una manera de reducir costos es suprimiendo uno de los interruptores de generador, en especial si existe un GE de potencia y características adecuadas para poner en marcha y detener en forma segura una unidad.

Debe existir enclavamiento eléctrico y mecánico en los interruptores de la barra de media tensión (52-SA1, 52-SA2, 52-SG y 52-OA) y en el interruptor 52-SAS.

De tal manera que se evite la alimentación simultánea de las fuentes y por consiguiente un cortocircuito en la barra.

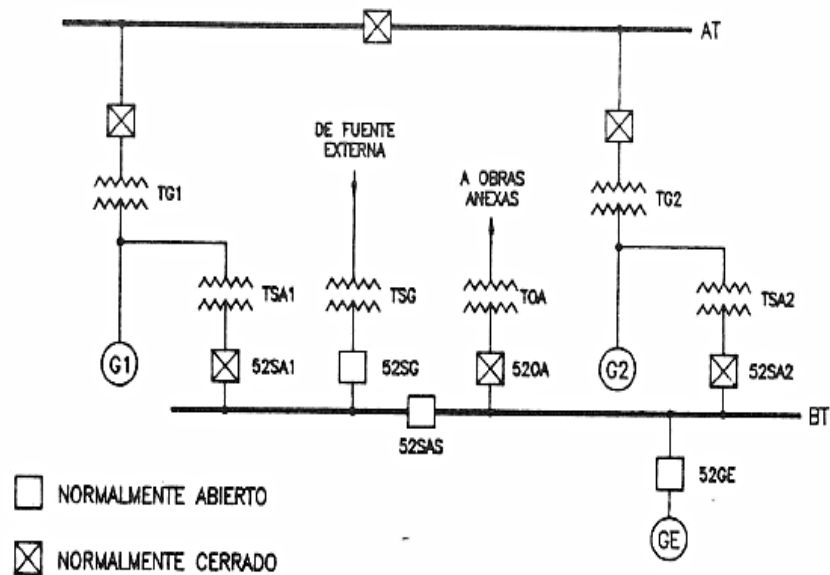


Figura 9: Sistema de unidades en bloque.

Fuente: Mantenimiento de Servicios Auxiliares de una Central Hidroeléctrica – Hernández Reyes Pedro Luis

1.6 Esquemas mediante fuentes de alimentación C.C.

De acuerdo a normas, necesidades aplicables y cargas prioritarias, los circuitos se deben subdividir para evitar que alguna falla deje sin energía a todo el sistema o interrumpa el suministro a un circuito esencial.

1.6.1 Esquema con una batería (BA) y un cargador de batería (CB)

Este tipo de esquema tiene una desventaja al solo contar con una batería. En caso de una falla en BA y CB, no se puede suministrar carga manual profunda a la batería, a menos que toda la carga se desconecte temporalmente. Es un sistema de bajo costo así como de confiabilidad muy baja.

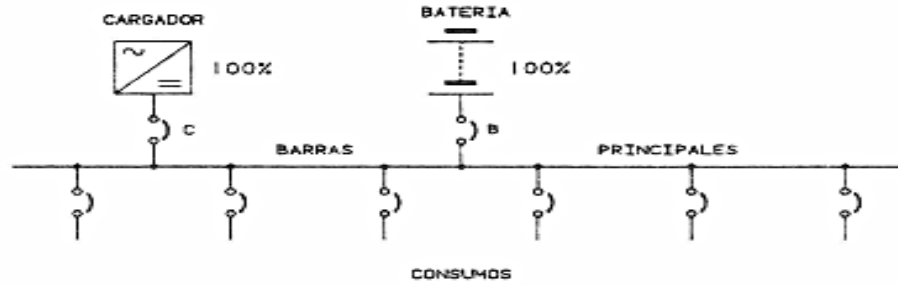


Figura 10: Sistema con una batería y un cargador

Fuente: Mantenimiento de Servicios Auxiliares de una Central Hidroeléctrica – Hernández Reyes Pedro Luis

1.6.2 Esquema con una batería y dos cargadores de batería.

En este caso, al tener dos CB se tiene respaldo de suministro de energía, el costo es mayor pero la confiabilidad mejora con respecto a la solución anterior.

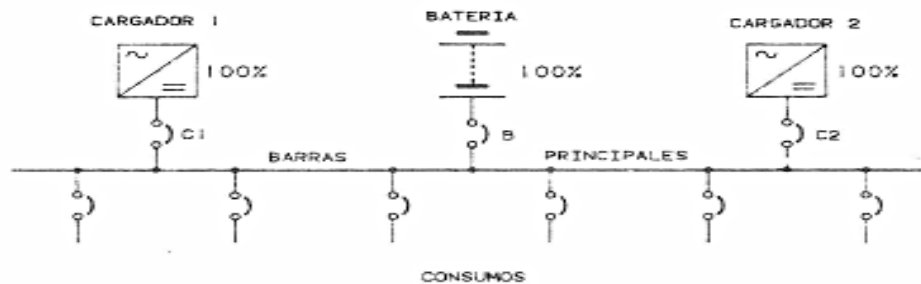


Figura 11: Sistema con una batería y dos cargadores

Fuente: Mantenimiento de Servicios Auxiliares de una Central Hidroeléctrica – Hernández Reyes Pedro Luis

Una desventaja de este esquema es la falta de respaldo en caso de falla de la BA y CB simultáneamente, agregándole a esto que no permite dar cargas de igualación o carga manual profunda a la BA, a menos que los consumidores se puedan desconectar temporalmente.

1.6.3 Esquema con dos baterías y dos cargadores de batería.

Al tener otra fuente de alimentación, una gran ventaja es aumentar la confiabilidad, ya que en caso de falla de un CB y una BA si permite dar carga de igualación o carga manual profunda a cualquier BA, manteniendo la tensión de la carga dentro de los niveles de regulación permitidos.

Al incrementar una batería al sistema el costo también lo hace, pero este incremento es relativamente pequeño desde el punto de vista de la continuidad de servicio y los daños por cortes bruscos disminuyen significativamente.

Los esquemas de las figuras 12a y 12b prácticamente tienen las mismas características, con una pequeña ventaja para la figura 12b, ya que para dar carga de igualación, por ejemplo a la batería de la barra sección 2, basta con cerrar el acople AB y abrir los interruptor CB2, C2 y B2 [3].

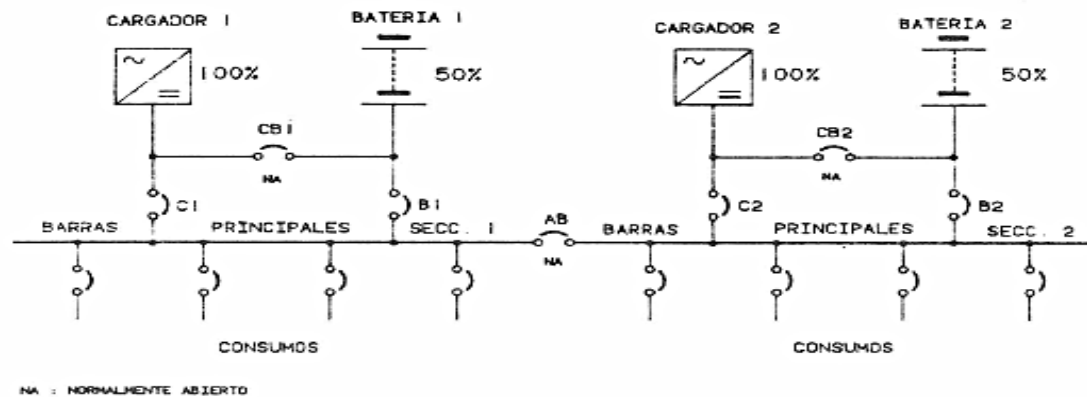


Figura 12a: Sistema con dos baterías y dos cargadores.

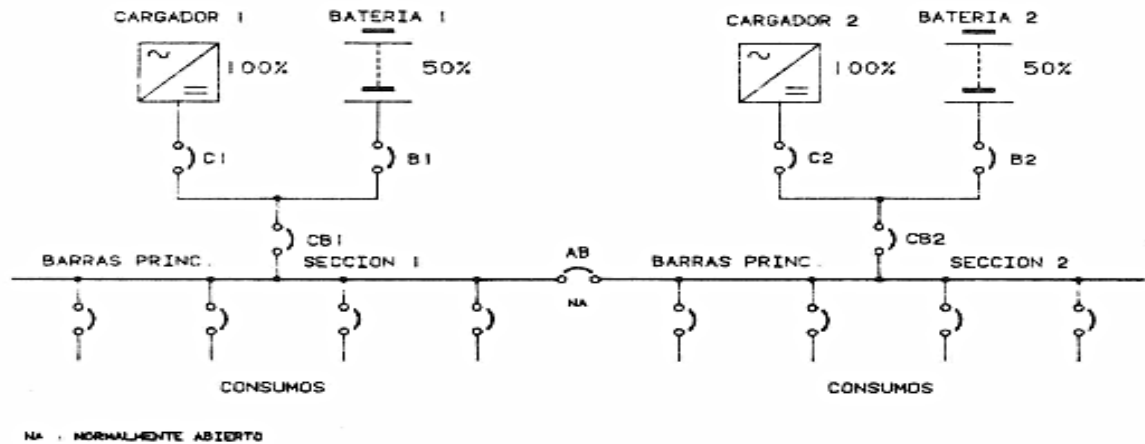


Figura 12b: Esquema con dos baterías y dos cargadores.

Fuente: Mantenimiento de Servicios Auxiliares de una Central Hidroeléctrica – Hernández Reyes Pedro Luis

En muchos casos una sola batería o hasta dos no es suficiente para abastecer el nivel de tensión que requieren equipos auxiliares de corriente continua, en tales casos se procede a conectar baterías en serie, conociéndose esto como un banco de baterías. (fig13)

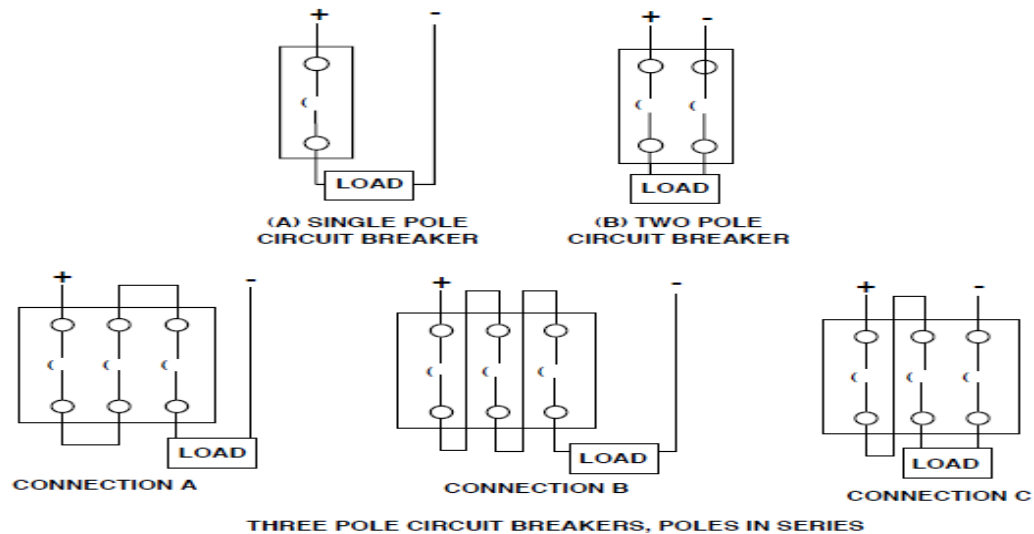


Figura 13: Conexión de baterías

Fuente: IEEE std 1375-1998. IEEE Guide for the Protection of Stationary Battery Systems.



1.7 Central Hidroeléctrica Mazar

1.7.1 Antecedentes

El proyecto hidroeléctrico Paute-Mazar, es el aprovechamiento de cabecera del Sistema Hidroeléctrico Paute Integral, que regula las aguas del río Paute para optimizar el aprovechamiento hidroeléctrico de las centrales: Mazar (170 MW), Molino (1.1000 MW), Sopladora (487 MW) y Cardenillo (327 MW), éstas dos últimas en proceso de construcción y diseño respectivamente.

La construcción del proyecto hidroeléctrico Sopladora tiene actualmente un avance de 67,20 % por ciento y entrará en operación en 2015. (*Publicación: 2014-08-15*). La central Mazar servirá para almacenar agua, de tal forma que permita regular los caudales de acceso a la central Molino, con lo cual se obtendrá un incremento promedio de energía de aproximadamente 500 GWh/año en dicha central, retener hasta 2 millones de metros cúbicos de sedimentos anualmente y además con sus 170 MW de potencia se podrá generar una energía promedio de 800 GWh/año. [11]

1.7.2 Información técnica de la Central Mazar

1.7.2.1 Casa de Máquinas

Tabla N° 1: Características de Casa de Máquinas

Tipo	Subterránea
Dimensiones (B x L x H)	21 x 62,50 x 41 m
Elevación del eje de las turbinas	1 994,50 msnm
Elevación del piso principal	2 006,60 msnm
Vol. Hormigón	13.160 m ³

Fuente: CELEC EP HIDROPAUTE



Fotografía 1: Casa de máquinas de la central Mazar

Fuente: Elaboración propia

1.7.2.2 Generador

Tabla N° 2: Características del Generador

Número	2 de eje vertical.
Capacidad por unidad	100 MVA
Velocidad	257.14 rpm
Factor de potencia	0,85 (inductivo)
Voltaje de generación	13,8 kV

Fuente: CELEC EP HIDROPAUTE

1.7.2.3 Turbina

Tabla N° 3 : Características de las Turbinas

Número	2
Tipo	Francis, eje vertical
Caudal máx. /unid.	70,55 m3/s

Capacidad por unidad	81,63 MW
Velocidad	257,14 rpm
Potencia máx.	91,83 MW
Caudal nominal/unid.	67 m ³ /s
Peso	19800 kg

Fuente: CELEC EP HIDROPAUTE.

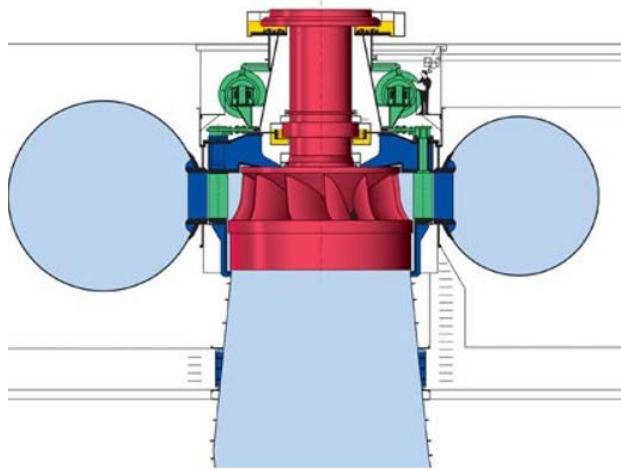


Figura 14: Turbina Francis eje vertical

Fuente: Francis turbine - Voith-Siemens-Markus Schweiss

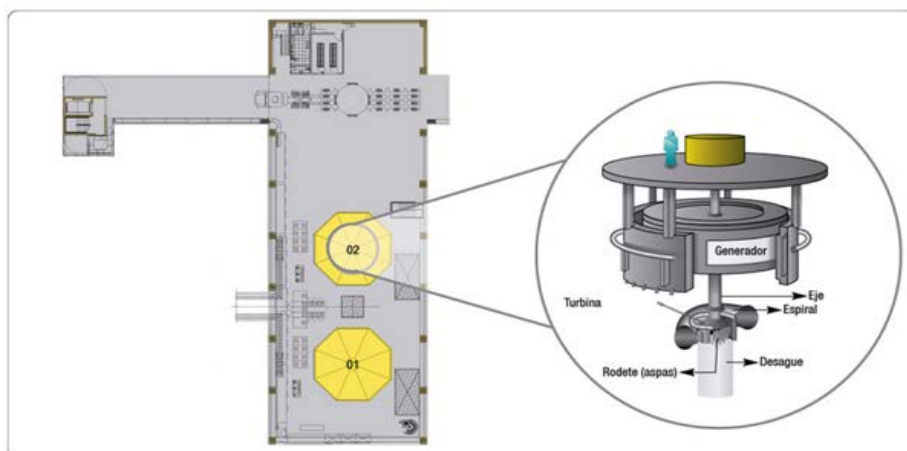
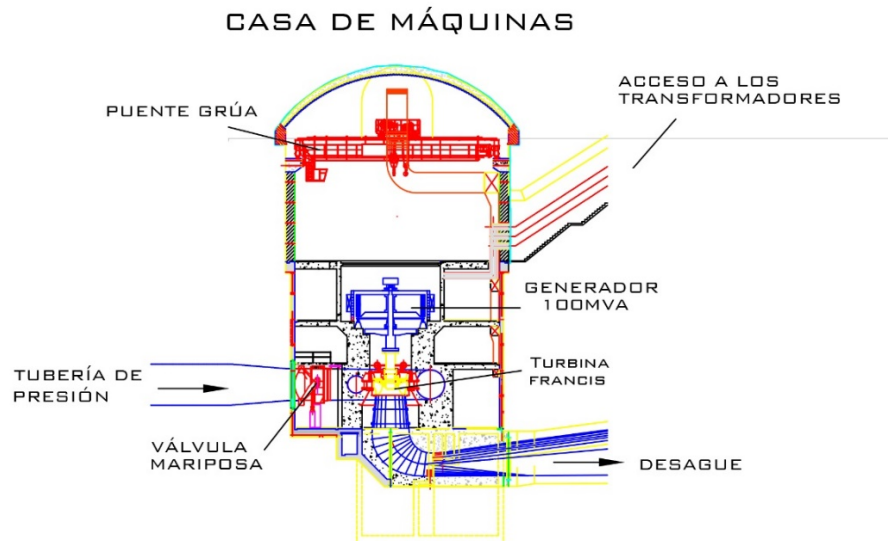


Figura 15: Generador y turbina en casa de máquinas

Fuente: CELEC EP HIDROPAUTE



Esquema 1: Casa de máquinas

Fuente: CELEC EP HIDROPAUTE

Caverna subterránea de 62.5 metros de longitud, 21 metros de ancho y 41 metros de altura. En ella se han instalado dos turbinas Francis de 91.84 megavatios de potencia máxima, cada una moverá dos generadores de capacidad unitaria de 85 megavatios totalizando una potencia instalada de 170 megavatios. La caverna alberga las turbinas, los generadores, los sistemas de control y comunicación y los sistemas auxiliares [11].

1.7.2.4 Transformador

Tabla N° 4: Características de los Transformadores

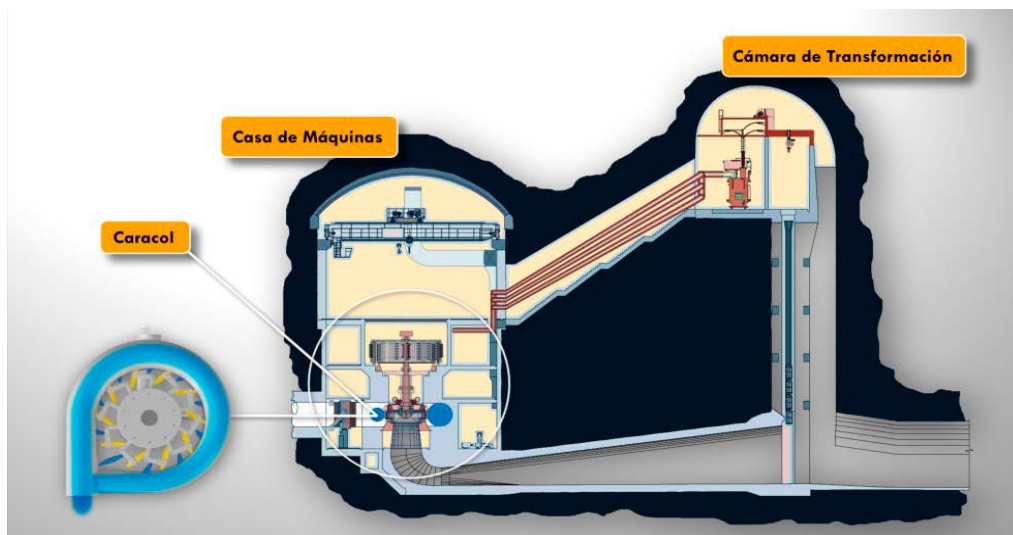
Número, tipo	2
Instalación	Subterránea
Capacidad	100 MVA
Voltaje	13,8/230 kV
Cables principales de 230 kV	Tipo de aislamiento sólido (XLPE)

Fuente: CELEC EP HIDROPAUTE.



Fotografía 2: Transformador elevador 100 MVA 13,8/230 kV

Fuente: Elaboración propia



Esquema 2: Casa de máquinas y Cámara de Transformación

Fuente: CELEC EP HIDROPAUTE

1.7.2.5 Subestación

Tabla N° 5: Características de la S/E GIS

Tipo	Exterior con aislamiento en gas SF6
Voltaje	230kV, dos módulos con interruptores, seccionadores y transformadores de corriente, dos entradas de transformador y dos salidas de líneas.
Dimensiones	66 m x 23 m
Ubicación	En la cota 2 213 msnm, junto al túnel de acceso a cresta de la Presa.

Fuente: CELEC EP HIDROPAUTE



Fotografía 3: Subestación de la central Mazar

Fuente: Elaboración propia

1.7.2.6 Presa

Tabla N° 6: Características de la presa

Tipo	(CFRD) Enrocado con cara de hormigón
Cota de coronación (con parapeto)	2 166m
Longitud coronación	340 m
Altura máxima (con para- peto)	166 m desde la cimentación



Volumen de hormigón	36.130 m ³
Volumen de relleno	5'483.000 m ³
Cota Talón	2000m
Cota Lecho (proyecto)	1990m
Espesor "Cara"	0,77m/0,30m
Espesor Plinto	0,90/0,50m
Ancho "Cara" –máx./min.	303m/80m
Ancho Plinto Izquierdo	10,50 m
Ancho Plinto Derecho (max/min)	9,00 m/7,00m
Ancho Base (presa)	500m

Fuente: CELEC EP HIDROPAUTE

Las Presas denominadas internacionalmente como CFRD (Concrete Face Rockfill Dam) Enrocado con cara de hormigón, se construyen con materiales como roca o aluviones gruesos producto de voladuras en canteras, estos materiales se los coloca en capas muy compactas para evitar que la presión del agua se abra paso a través de la misma.

Las características morfológicas de estas presas permiten manejar con mayor comodidad geométrica para la zonificación de los materiales en localizaciones previamente establecidas. El cuerpo de la presa se apoya sobre roca de suficiente resistencia o sobre aluviones de río si estos tienen la aptitud mecánica e hidráulica adecuada.¹

¹ XX Congreso Argentino de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica 2010
CAMSIG 2010, Mendoza, Argentina
E. Núñez



Fotografía 4: Presa de Mazar

Fuente: Elaboración propia

La presa de 166 metros de altura está construida con un relleno de roca con un volumen aproximado de 5 millones de metros cúbicos y una losa de hormigón sobre la cara aguas arriba de la presa como elemento impermeable. Para el relleno de la presa se utilizó material obtenido de la explotación de las canteras adyacentes a la presa: cantera de la Bola y cantera de Ingapata.

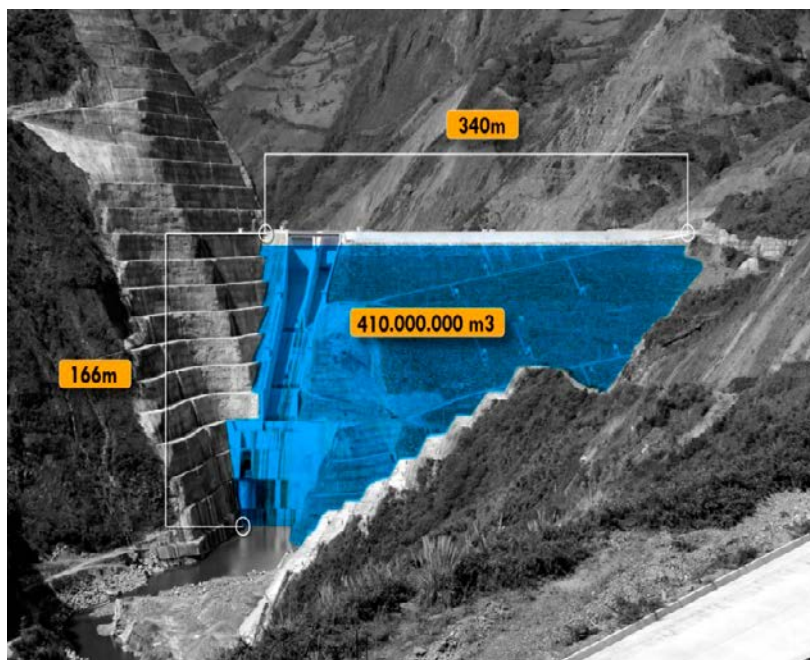
1.7.2.7 Embalse

Tabla N° 7: Características del embalse

Nivel máximo normal	2153 msnm
Nivel máximo correspondiente a la CMP	2165,50 msnm
Nivel mínimo de operación de la central	2098 msnm
Volumen total	410 Hm ³

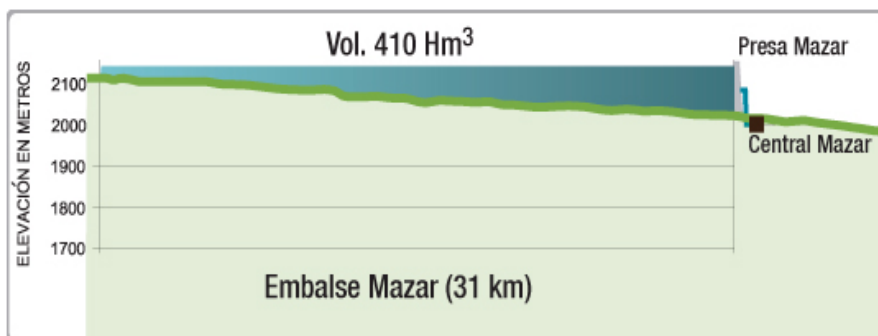
Volumen útil (2 153 - 2 098 msnm) inicial	309 Hm ³
Longitud aproximada	31 km
Área de la cuenca	4 338 km ²

Fuente: CELEC EP HIDROPAUTE



Esquema 3: Embalse 410 Hm³

Fuente: CELEC E.P. HIDROPAUTE



Esquema 4: Embalse Mazar (31 km)

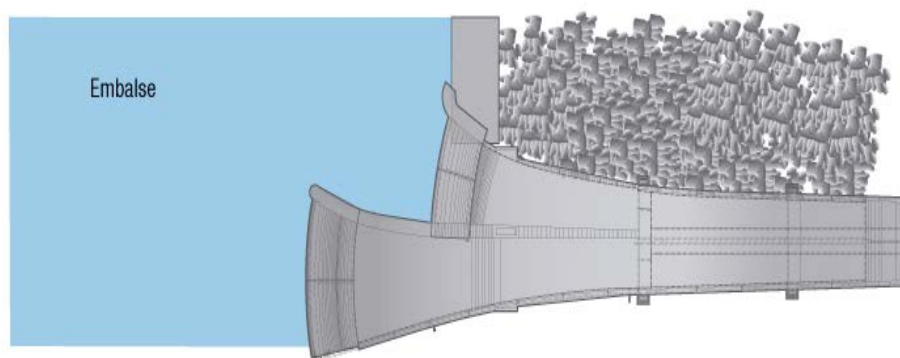
Fuente: CELEC E.P. HIDROPAUTE

1.7.2.8 Vertederos

Tabla N° 8: Características de los vertederos

Tipo	A cielo abierto rectangular sin compuertas
Capacidad máxima de descarga	7500 m ³
Altura Caída	153 m
Vol. Hormigón Conv.	55870 m ³
Vol. Excavación	2508000 m ³
Vol. Excavación Cuenco	820000 m ³
Cota Estructura de Control	2153 m.s.n.m.
Cota Salto de Esquí	2060 m.s.n.m.
Cota del Cuenco	2000 m.s.n.m.

Fuente: CELEC E.P. HIDROPAUTE



Esquema 5: Embalse de Mazar

Fuente: CELEC E.P. HIDROPAUTE

Los vertederos a cielo abierto sin compuertas se encuentran localizados en el estribo derecho de la presa, para evacuar el exceso de agua cuando alcanza el nivel máximo del embalse de 7500 metros cúbicos por segundo. Dispone de un

saldo en esquí, cuyo desfogue de agua va hacia un cuenco amortiguador excavado en la margen izquierda del río Paute.



Esquema 6: Características de los túneles

Fuente: CELEC E.P. HIDROPAUTE

1.7.2.9 Desagüe de fondo

Su función principal es regular el caudal aguas abajo de la presa Mazar, permitiendo normalizar los caudales de acceso a la central Molino, con lo cual se obtendrá un incremento promedio de energía en la misma, otra función principal del desagüe de fondo es la de liberar sedimentos relativamente grandes acumulados en la profundidad del embalse.

Tabla N° 9: Características del desagüe de fondo

Tipo	Túnel con cámara de compuertas
Sección baúl (B x H)	6,3 m x 6,15 m
Longitud total	376 m
Capacidad máxima de descarga	450 m3/s con nivel máximo
Cota solera	2.060 m.s.n.m.

Fuente: CELEC E.P. HIDROPAUTE



Fotografía 5: Desagüe de fondo de la central Mazar

Fuente: Elaboración propia

1.7.2.10 Túnel de carga

La función principal del túnel de carga es la de trasladar el agua desde el embalse hasta la tubería forzada, con una longitud de 433 metros y una pendiente máxima de 5.8%.

Tabla N° 10: Características del túnel de carga

Cota solera en la toma	2 083 msnm
Cota máxima de operación	2 153 msnm
Cota mínima de operación	2 098 msnm
Sección herradura (BxH)	6,30 m x 6,10 m
Longitud	433 m
Caudal de diseño	141,1 m ³ /s
Pendiente	0,48% - 5,8%
Revestimiento	Hormigón armado

Fuente: CELEC EP HIDROPAUTE

1.7.2.11 Tubería forzada

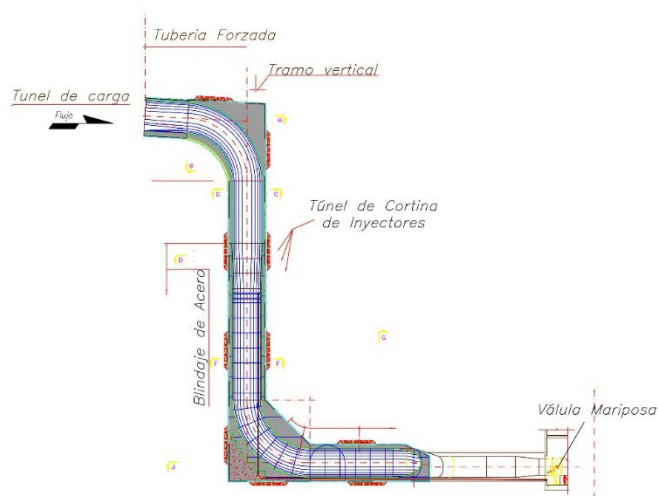
La tubería forzada tiene el objetivo de conducir el agua desde el tramo final del túnel de carga proveniente de la presa, en tal punto se tiene una considerable energía potencial y energía cinética.

En este proceso se presenta una transformación de energía, la energía potencial del agua disminuye a medida que ésta desciende y al mismo tiempo se incrementa la energía cinética y presión.

Tabla N° 11: Características de la tubería forzada

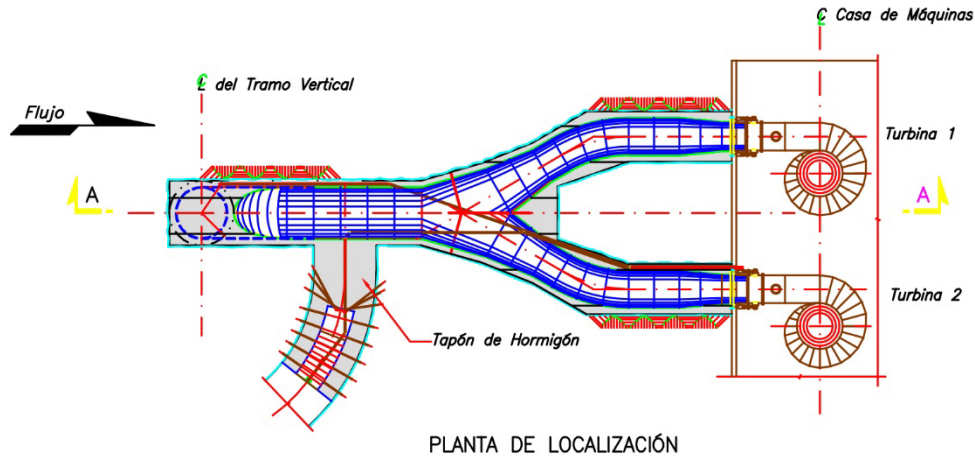
Cota superior	2 039 msnm
Tipo	Pozo vertical, con revestimiento de hormigón y parcialmente blindado
Altura de Caída	68 m
Diámetro	6,10 m
Longitud Tramo Horizontal	25m

Fuente: CELEC EP HIDROPAUTE



Esquema 7: (a) Tubería forzada (tramo vertical)

Fuente: CELEC E.P. HIDROPAUTE



Esquema 7: (b) Tubería forzada (tramo horizontal)

Fuente: CELEC E.P. HIDROPAUTE

1.7.2.12 Túnel de Equilibrio

Son tuneles de presión de las turbinas que se utilizan para evitar el llamado “golpe de ariete”, que se produce cuando hay un cambio repentino de presión debido a la apertura o cierre rápido de las válvulas en una instalación hidráulica.²

Tabla N° 12: Características del túnel de equilibrio

Sección (BxH)	8m x 7,75m (utilizando parte del túnel de construcción)
Longitud	366,70 m
Pendiente	12,50%

Fuente: CELEC E.P. HIDROPAUTE

² Centrales Hidroeléctricas Endesa Educa



1.7.2.13 Túnel de Descarga

Después de haber pasado por todo el proceso de generación de energía eléctrica mediante el aprovechamiento del agua proveniente del embalse, esta procede a evacuar la turbia hacia el río nuevamente mediante el túnel de descarga, ubicado aguas abajo de la presa.

Tabla N° 13: Características del túnel de descarga

Sección herradura (BxH)	8 m x 7,75 m
Revestimiento	Hormigón
Longitud total	732 m
Pendiente	0,5%

Fuente: CELEC E.P. HIDROPAUTE

1.7.2.14 Pozo de Transporte, Cables y Ascensor

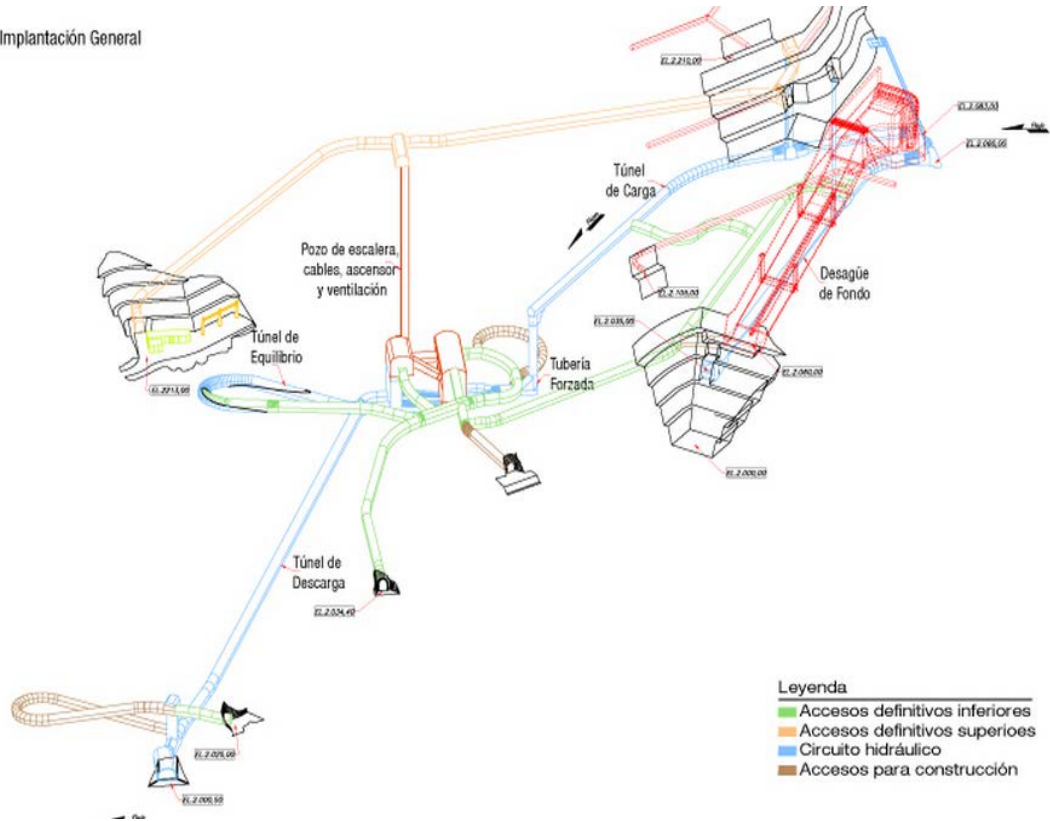
Es el lugar por donde se evacua la energía mediante instalaciones subterráneas con cables revestidos con XPLE polietileno reticulado.

Tabla N° 14: Características del pozo de transporte, cables y ascensor

Tipo	Vertical, subterráneo, revestido de hormigón
Altura	205 m
Diámetro	10,0 m

Fuente: CELEC E.P. HIDROPAUTE

Implantación General



Esquema 8: Implantación general

Fuente: CELEC E.P. HIDROPAUTE



CAPÍTULO 2

ANÁLISIS DEL ENTORNO

2.1 Criterios de diseño, Servicios Auxiliares de corriente alterna de la central Mazar.

2.1.1 Normas técnicas vigentes para el diseño

Todos los trabajos de diseño de la central hidroeléctrica Mazar referente a Ingeniería Eléctrica se elaboraron con la última revisión de las normas aplicadas a las instalaciones específicas contempladas en los diseños:

Normas de aplicación general

IEC 60038, IEC Standard voltajes

Esta norma analiza los aspectos de los sistemas para el suministro de energía eléctrica. Define un conjunto de tensiones nominales permitidas para uso en baja y alta tensión de CA o CC de 50/60Hz, para el correcto funcionamiento de los equipos. De esta norma se destaca que en condiciones normales de funcionamiento, la tensión de alimentación no debe diferir de la tensión nominal del sistema en más de $\pm 10\%$ [14].

ANSI C84.1, “Voltage Ratings for Electric Power System and Equipment”

Esta norma establece los rangos de voltaje nominales y tolerancias de funcionamiento para 60 Hz en sistemas de energía eléctrica por encima de 100 voltios. Esta norma incluye capacidades de voltaje hasta 1.200 kV de tensión máxima del sistema, como se especifica en la norma. En la definición de máxima tensión del sistema, los transitorios de tensión y sobretensiones



temporales causados por anomalías se excluyen de las condiciones del sistema, así como fallas, rechazo de carga, y similares. Sin embargo, los transitorios de tensión y sobretensiones temporales pueden afectar el desempeño operativo de equipos y se consideran en equipos de aplicación [15].

2.1.2 Criterios de diseño

El sistema de Servicios Auxiliares de la central Mazar fue diseñado según los siguientes criterios:

- Seguridad para el personal.
- Vulnerabilidad a agentes naturales y humanos.
- Confiabilidad en el suministro de energía a los equipos.
- Eficiencia durante la operación.
- Simplicidad para la operación.
- Flexibilidad para efectuar modificaciones.
- Mantenibilidad del sistema.
- Economía en los equipos, la construcción, los montajes, la operación y el mantenimiento.
- Redundancia en la alimentación eléctrica de los sistemas auxiliares eléctricos y de los equipos de emergencia. [20]

2.2 Descripción del Centro de Fuerza

En el **ANEXO 1 - CENTRO DE FUERZA MAZAR** se presenta la topología del sistema eléctrico conectado a la barra del Centro de Fuerza TDSM. Obsérvese que hay cinco posiciones en 13,8kV conectadas a la barra BSM1, un interruptor de acople (52-BSM12) y cuatro posiciones conectadas a la barra BSM2.



Las cinco posiciones conectadas a la barra BSM1 son:

- Molino 1 a través del interruptor 52-LTM1.
- Transformador (U01) TAG1 mediante el interruptor 52-TAG1.
- Transformador (AUX-CM) TSA1 a través del interruptor 52-TSA1.
- Reserva por medio del interruptor 52-R.
- Transformador (Presa – DF) TPR de la Presa a través de la llave seccionadora 89-TPR.

Las cuatro posiciones conectadas a la barra BSM2 son:

- Molino 2 a través del interruptor 52-LTM2.
- Transformador (U02) TAG2 a través del interruptor 52-TAG2.
- Transformador (AUX-CM) TSA2 mediante el interruptor 52-TSA2.
- Transformador (GIS-ES) TES del Edificio de Servicios por medio de la llave seccionadora 89-TES.

Cuando los generadores se encuentran en condiciones normales de operación, tanto los Servicios Auxiliares de las unidades como de la central son auto-alimentados por las unidades de generación mediante una derivación en las barras blindadas que van hasta los Transformadores de Aislamiento Galvánico (TAG1 y TAG2) y que pasan por un interruptor principal CIP y un banco de reactores limitadores de corrientes RLC como se muestra en el **ANEXO 2 - UNIFILAR MAZAR [11]**.

Si las unidades generadoras se encuentran fuera de servicio, los Servicios Auxiliares podrán ser alimentados desde las siguientes fuentes:

- Línea aérea a doble circuito de 13,8kV que conecta la central Mazar con la central Molino (LTM1 y LTM2).
- Un generador diésel de emergencia (GED) de 1MVA. A una tensión de 480V.

El GED tiene un tanque diario de 500 galones y uno de reserva de 5000 galones de combustible, arranca automáticamente 10 segundos después de haber detectado la ausencia de tensión en las otras fuentes de alimentación, e inicia la toma de carga 30 segundos después de su arranque [17].

El GED es capaz de alimentar todas las cargas prioritarias de la central Mazar, es decir, cargas necesarias para el arranque y operación de una unidad generadora y para la seguridad de toda la instalación.

El grupo consiste de un motor diésel de tipo estacionario para instalación en local interior y de un generador sincrónico trifásico con neutro accesible, autoventilado, especial para cargas asimétricas, ambos montados sobre una base común rígida de acero con amortiguadores de vibración.



Fotografía 6: Generador diésel de emergencia 1MVA



Fuente: Elaboración propia

En ocurrencia de un Black-Out ³ el GED arrancaría de inmediato alimentando a las unidades generadoras en aproximadamente *30 segundos*, lo cual permitiría que después de ese tiempo los generadores tomen carga de los Servicios Auxiliares de la central, de esta manera normalizando el sistema [17].

El GED, fue dimensionado con una potencia mayor a la requerida por los Servicios Auxiliares de la central Mazar, debido a que en estudios de diseño se aumentó la confiabilidad del sistema Mazar-Molino, es decir, si el centro de fuerza de la central Molino pierde su sistema de alimentación éste puede ser energizado mediante una línea de transmisión a 13,8kV, que le permita garantizar el proceso de parada y/o re-arranque de sus unidades en Molino [17].

2.3 Distribución primaria del Centro de Fuerza

La distribución primaria, es a 13,8kV línea a línea, trifásico, 60 Hz, con el neutro conectado sólidamente a tierra. El Tablero de Distribución de Servicios Auxiliares de Media Tensión 13.8 kV del Edificio de Servicios (TDSM), cuenta con 2 barras BSM1 Y BSM2 que son acopladas por un interruptor (52-BSM12) que se cierra si y solo si se tiene una sola fuente de alimentación [12].

2.4 Distribución secundaria del Centro de Fuerza.

La distribución secundaria se realiza mediante tableros de distribución con el neutro conectado sólidamente a tierra para los Servicios Auxiliares comunes y de unidad, estos tableros se encuentran a un nivel de tensión de 480/277 V y a una frecuencia de 60 Hz.

³ Black-out.- Colapsos o apagones en los cuales el Sistema Eléctrico de Potencia se desconecta completa o parcialmente (60%).



Para los servicios de iluminación y tomacorrientes la tensión es de 220/127 V, a 60 Hz, con el conductor central sólidamente conectado a tierra [12].

Los tableros de distribución son de tres tipos:

- *Tableros de distribución principal.* Alimentan fundamentalmente otros tableros sea directamente o a través de transformadores. La configuración del tablero de distribución principal (TDCM), es de barraje seccionado y alimentación en cada barra a través de un interruptor, estos interruptores se encuentran enclavados eléctricamente conformando una transferencia automática [12].
- *Tablero de distribución de cargas.* Para garantizar la continuidad en el suministro de energía, se cuenta con alimentaciones redundantes con transferencia automática en los tableros que atienden cargas críticas, estas alimentaciones provienen de cada sección de barra del tablero TDCM. Los tableros de distribución y centros de control de motores que tienen esta configuración son: CCMU1, CCMU2, CCMVAC, CCMDD y TDCGCM. Los tableros de Servicios Auxiliares TDTA y TDPS de la cámara de compuerta del túnel de carga y de la presa respectivamente, son alimentados por el transformador TPR a nivel de 13,8 kV [12].
- *Los tableros de servicios misceláneos.* Estos tableros son a 220/127 V, alimentan las cargas de alumbrado, tomacorrientes, calefacción, las salidas para servicios de equipos de taller, la alimentación redundante de la fuente de potencia ininterrumpida UPS, etc. [12].



2.5 Descripción del sistema de S.A. de Corriente Continua

Este sistema alimenta cargas esenciales que cumplen las funciones de control y señalización en los tableros.

El sistema de corriente continua tiene dos fuentes de alimentación:

La primera a través de dos cargadores de baterías que rectifica la alimentación en CA desde el tablero de distribución de cargas generales TDCGCM y entrega una señal en corriente continua de 125 Vcc. En caso de pérdida, la segunda fuente de alimentación, son bancos de baterías de 58 x 2V con una capacidad de 1000 Voltamperios Hora.

La alimentación de los equipos de sala de control e iluminación de emergencia de casa de máquinas y edificio de servicios, se realiza por medio de 4 inversores que son alimentados en corriente continua transforma en una fuente de corriente alterna a un nivel de tensión de 127Vca (Inversores 1 y 2) y 220Vca (Inversores 3 y 4).

Existen en casa de máquinas dos tableros principales de corriente continua (TDCCP1 y TDCCP2) que son alimentados desde el cargador de baterías estos a su vez alimentan a cuatro tableros secundarios (TDCCG1, TDCCG2, TDCCU1 y TDCCU2) y estos a todos los tableros que requieren una alimentación de corriente continua.

Las cargas del tablero TDSI se alimentan a través de inversores 1 y 2 en 127Vac. Por medio del TFACA en condiciones normales. (**ANEXO 3 - UNIFILAR MAZAR C. CONTINUA**)

2.6 Potencia requerida por los Servicios Auxiliares de la central.

Para conocer la potencia requerida por los Servicios Auxiliares de la central se llevaron a cabo mediciones en distintos tableros, la información registrada incluyó la potencia de cargas adicionales que no se encontraban en funcionamiento durante la toma de medidas como es el caso de los motores del desagüe de fondo, bombas del sistema de desagüe, puentes grúa, entre otros.

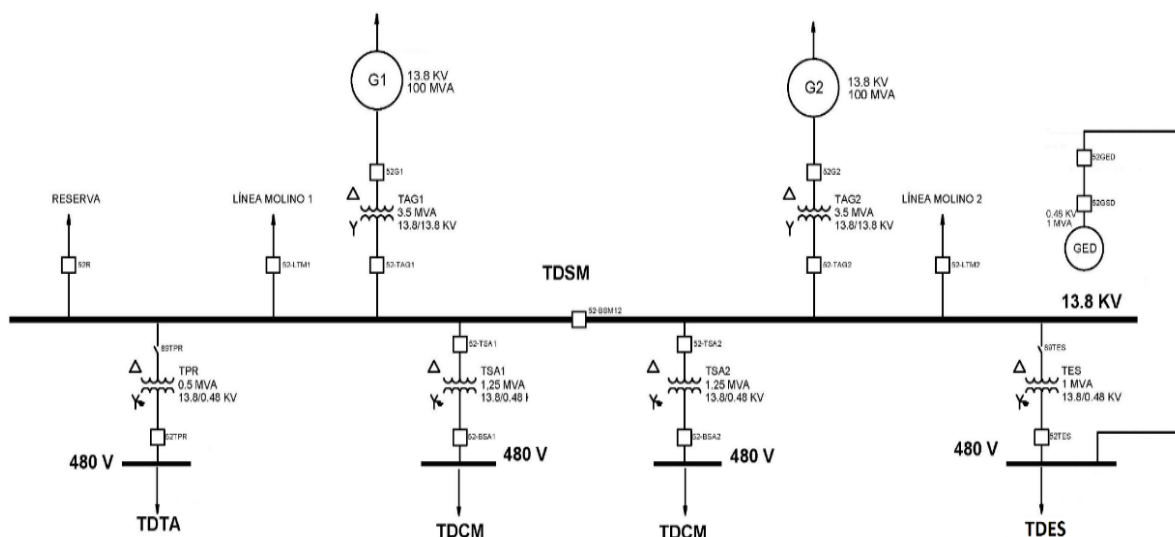


Figura 16: Unifilar simplificado de cargas de los S.A.

Fuente: Elaboración propia

En la fig. 16 se considera como cargas a los transformadores TSA1, TSA2, TPR y TES, en los cuales se realizaron las mediciones de potencia considerando lógicamente los equipos que en ese momento estaban en funcionamiento.

En la tabla que se ilustra a continuación se indican las potencias de los elementos principales como transformadores de Servicios Auxiliares entre otras cargas en general.



Tabla N° 15: Medición de cargas de los S.A. de la Central

CARGAS	DESCRIPCIÓN	S (MVA)	P (MW)	Q (MVar)
TSA 1	Transformador principal de Servicios Auxiliares No. 1	0,300	0,230	0,180
TSA 2	Transformador principal de Servicios Auxiliares No. 2	0,120	0,120	0,020
TPR	Transformador para alimentación zona de la Presa	0,031	0,029	0,011
TES	Transformador alimentación Edificio de Servicios	0,012	0,010	0,006
OTRAS	Limpia rejillas, Motores Desagüe de fondo, Puentes grúa, etc.	0,393	0,3039	-0,2209
TOTAL		0,856	0,6929	-0,0039

Fuente: Elaboración propia

2.7 Lógica de transferencia de fuentes para los Servicios Auxiliares.

2.7.1 Transferencia automática de fuentes

Los Servicios Auxiliares de la central Mazar pueden ser alimentados en el siguiente orden prioritario:

Prioridad 1: Unidades de Generación: TAG1 y TAG2.

Prioridad 2: Líneas de Transmisión desde Molino LTM1 y LTM2.

Prioridad 3: Generador de emergencia GED.

El acople 52-BSM12 se cerrará dependiendo del número de fuentes (1 o 2) DE LA MISMA PRIORIDAD que estén disponibles. (Ver **ANEXO 4 - LÓGICA DE TRANSFERENCIA**).

Se aclara de manera expresa que ninguna fuente proveniente de Mazar podrá operar en paralelo con las fuentes provenientes de Molino.

Existen funciones de bloqueo implementadas que impiden el cierre del interruptor sobre un circuito que haya sido desconectado por protección, evitando así el cierre sobre falla.

Los comandos de apertura y de cierre de los interruptores son iniciados por relés de baja tensión (27), con un rango de ajuste entre 0,8 a 1,1 de la tensión nominal. Los circuitos de control de los interruptores son alimentados a través del sistema de Servicios Auxiliares de 125Vcc [16].

A continuación se presenta una tabla con los modos de operación de la central.

Tabla N° 16: Modos de operación

MODOS DE OPERACIÓN	INTERRUPTORES (52)							
	52 TAG1	52 TAG2	52* M1	52 LTM1	52* M2	52 LTM2	52BS M12	52 GED
I	X	X	O	O	O	O	O	O
II	O	X	O	O	O	O	X	O
III	X	O	O	O	O	O	X	O
IV	O	O	X	X	X	X	O	O
V	O	O	O	O	X	X	X	O
VI	O	O	X	X	O	O	X	O
VII	O	O	O	O	O	O	X	X
MANUAL	X	X	O	O	O	O	O	X
MANUAL	O	O	X	X	X	X	O	X

X – INTERRUPTOR CERRADO O RELÉ OPERADO

O – INTERRUPTOR ABIERTO O RELÉ DESOPERADO

Fuente: CELEC E.P. HIDROPAUTE



2.8 Interrupciones debido a transferencias automáticas de fuentes en el Centro de Fuerza TDSM.

Por concepto, la central Mazar fue construida principalmente para regular el caudal del río Paute, es por ello que la operación de sus unidades generadoras se realiza de manera cíclica, provocando apagones debido a la transferencia de fuentes al entrar o salir de funcionamiento sus unidades generadoras.

Para esta transferencia se utiliza una conmutación automática, como las que se describen a continuación:

a) *Conmutación instantánea:*

Entre dos redes síncronas con pequeñas diferencias en los desfases de las tensiones y con un tiempo de conmutación muy pequeño ($t_c < 0,05s$), se verifica que la corriente de arranque es aproximadamente:

$$\frac{I_{arr}}{I_{nMotor}} \approx (1 \dots 1,5).$$

b) *Conmutación rápida:*

El tiempo de conmutación está comprendido entre $t_c \approx (0,05 \dots 0,15s)$.

Con ello el segundo interruptor no se cierra antes de que el primero se haya abierto, pero, es tan rápida que la diferencia de tensión se mantiene por debajo de un valor determinado, por ejemplo $1.4U_N$. Para la corriente

de arranque se verifica: $\frac{I_{arr}}{I_{nMotor}} \approx (1,5 \dots 3).$



c) *Conmutación con tiempo residual:*

En este caso, la conmutación sólo se realiza cuando la tensión en bornes de los motores (grupos de motores más otras cargas de los Servicios Auxiliares) haya disminuido hasta el valor por debajo del 40% de la tensión nominal. El tiempo de conexión en este caso puede ser de 1 segundo o más y la corriente de arranque puede estar comprendida entre el intervalo de: $\frac{I_{arr}}{I_{nMotor}} \approx (3 \dots 5)$.

d) *Conmutación lenta:*

En esta conmutación se elige, a partir de ensayos, un tiempo t_c , tal que la diferencia de tensiones U_D se mantenga inferior al 40% y que la conmutación transcurra del mismo modo que la conexión de un grupo de motores, la corriente de arranque está comprendida entre:

$$\frac{I_{arr}}{I_{nMotor}} \approx (4 \dots 6).$$

Las conmutaciones instantáneas y rápidas exigen como condición previa interruptores con tiempos de conexión y desconexión totalmente breves.

Si el tiempo de conexión es mayor que el tiempo total de desconexión, se dan las órdenes de desconexión y conexión simultáneas. [13]

El tiempo de conmutación depende en si del tipo de carga, siendo un problema generalizar la alimentación para grupos de motores y tableros electrónicos, ya que poseen diferentes características eléctricas.



A continuación se registran los tiempos de actuación de los interruptores, comprendidos en el período de treinta días, (ver **ANEXO 4 - LÓGICA DE TRANSFERENCIA**).

Si bien los datos registrados no son exactamente iguales, estos se asemejan al considerar muchas muestras, se ha observado que ciertas transferencias pueden alcanzar una duración de hasta 8 segundos, dicho de otra manera, una parte del sistema eléctrico de la central deberá permanecer 8 segundos sin suministro de energía eléctrica, ocasionando pérdida de iluminación y posibles averías en algunos equipos al producirse la conmutación.

2.9 Análisis del impacto de las transferencias.

Al momento de ejecutar el tipo de maniobras ya descritas, se presentan fenómenos transitorios debido al retardo en la operación de los interruptores de potencia, la magnitud de estas perturbaciones dependerá del punto sobre la onda donde se produce la conmutación, es decir, entre el mínimo o máximo valor de la onda durante el cierre o apertura de los contactos del interruptor.⁴

Los citados transitorios, pueden presentarse de forma aleatoria como en el caso de corto circuitos, conmutaciones de relés o descargas atmosféricas de forma periódica y repetitiva.

Como se observó en la sección anterior, los retardos de tiempo en las transferencias suceden en un promedio que está comprendido **entre 1 a 8**

⁴ *Fenómenos transitorios en maniobras de conmutación en interruptores de poder en redes de Alta Tensión.*
Por Christian Leiva, Service LAM Technical Competency and Resource Manager de Alstom Grid Chile.



segundos aproximadamente dependiendo de cuál sea el estado inicial, la cual es una combinación de los tres tipos de conmutación antes mencionados, conmutación rápida, conmutación con tiempo residual y conmutación lenta.

Por otra parte, la apertura del circuito de una línea bajo carga puede ser el origen de una fuente de sobretensión, puesto que la energía que almacena el circuito en forma de campo magnético ha de desaparecer con la interrupción de la corriente y, por tanto, habrá de transformarse en gran medida en energía electrostática aumentando considerablemente el nivel de tensión si la capacidad de la línea es pequeña y la corriente elevada. [13]

Para el estudio de las perturbaciones originadas por conmutación de interruptores se analizará las gráficas de tensión en función del tiempo, tomadas con el equipo de medición FLUKE ScopeMeter 199c (*Measure Control Signals and Mains Voltage*), ya que las transferencias en sistemas de potencia provocan, incluso en condiciones normales de funcionamiento, cambios bruscos de tensión y de corriente con dv/dt ⁵ de varios miles de voltios por segundo, provocando de esta manera que algunos equipos eléctricos y electrónicos reduzcan su vida útil, tales como; cargadores de baterías e inversores, así como también se presenta averías en el sistema de vigilancia, en el ascensor y en iluminación, además de causar molestias al personal que se encuentre dentro de la central en el momento de la transferencia.

⁵ Variación de tensión con respecto al tiempo.

Asimismo, los equipos están sometidos a trabajar con valores de tensión muy bajos durante un período de tiempo relativamente extenso disminuyendo su vida útil como se observa en la fig. 20.

En condiciones normales se registran niveles de tensión tolerables tomados en los cargadores de batería (CB) e inversores (INVS), como se muestra en la siguiente gráfica:

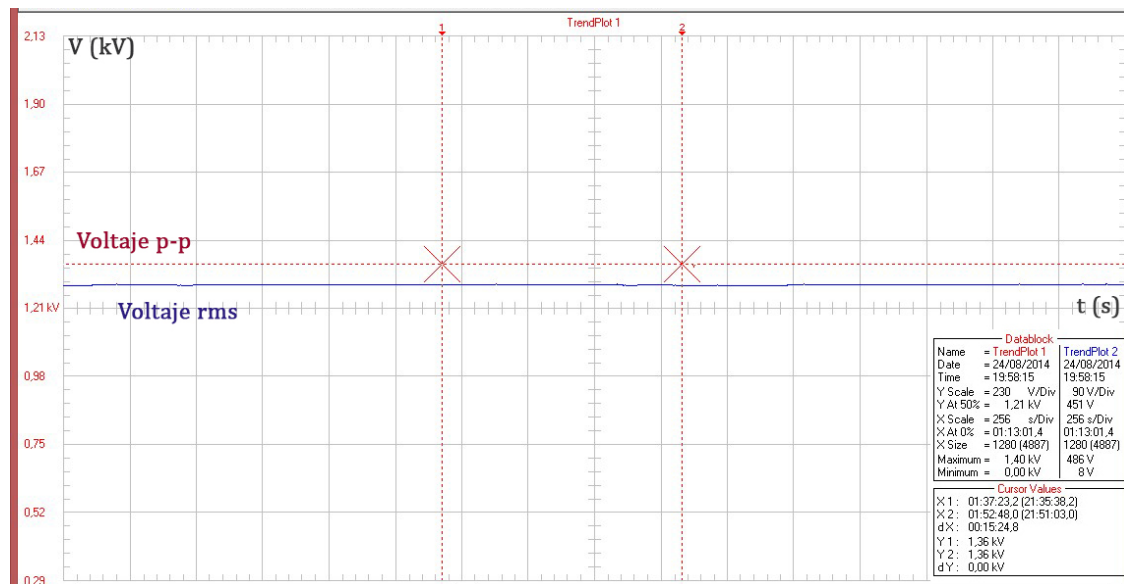


Figura 17: Nivel de tensión en condiciones normales de operación medido en el CB1

Fuente: Elaboración propia

En el momento de la transferencia se observan picos de tensión, los cuales afectan de manera negativa a la mayoría de dispositivos electrónicos (fig. 18), ya que dichos picos presentan una variación brusca de tensión con un $\frac{dv}{dt} = 2187,5 \frac{\text{Voltios}}{\text{Segundo}}$ además de tener variaciones tanto en el voltaje pico-pico (voltaje p-p) como en el valor eficaz (voltaje rms).

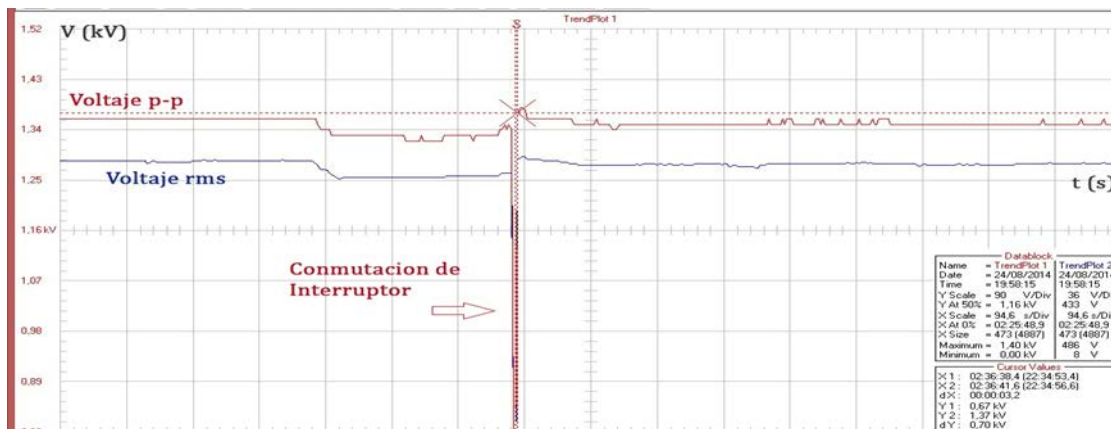


Figura 18: Picos de tensión durante una transferencia con un alto valor de $\frac{dv}{dt}$ medido en el INVS13

Fuente: Elaboración propia

En la siguiente figura se muestra la variación de tensión tomada en el cargador de batería 1 (CB1) al momento de la séptima transferencia. Al igual que la figura anterior se observa variaciones bruscas de tensión y extensos tiempos sin suministro de energía eléctrica.

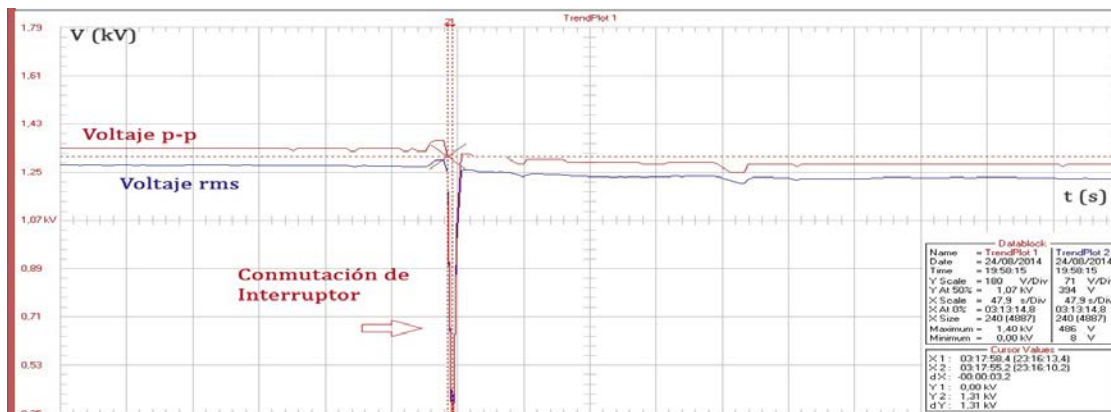


Figura 19: Picos de tensión durante una transferencia con un alto valor de $\frac{dv}{dt}$ medido en el CB1

Fuente: Elaboración propia

Cuando el centro de fuerza es autoalimentado, se observa que el nivel de tensión permanece dentro de los límites de regulación establecidos, después de la transferencia hacia las líneas LTM1 y LTM2 existe una caída de tensión

considerable alrededor del 6% por debajo de la tensión nominal, lo cual se muestra a continuación.

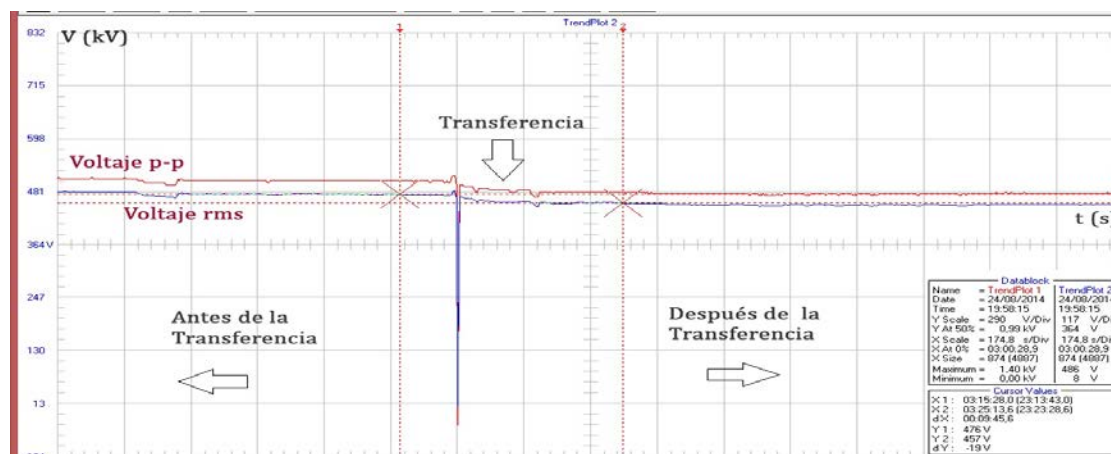


Figura 20: Picos de tensión durante la quinta transferencia con un alto valor de $\frac{dv}{dt}$ medido en el CB1.

Fuente: Elaboración propia

Perturbaciones como estas interfieren en el funcionamiento correcto de algunos equipos y reducen la vida útil de otros.

Siendo así, se demuestra que las variaciones bruscas de tensión y de corriente producen averías en tableros electrónicos, ya que, estos están constituidos de elementos sensibles a dichos fenómenos. Por otra parte, al analizar el tiempo de reconexión en cada transferencia, presenta extensos retardos en los cuales los equipos deben estar sometidos periódicamente a niveles bajos de tensión.

En las siguientes fotografías se muestran algunos equipos que han sufrido averías que estos fenómenos contribuyeron para el deterioro de estos equipos., siendo estos: cargadores de batería e inversores.



Fotografía 7: Equipos averiados en bodega

Fuente: Elaboración propia



Fotografía 8: Inversor y cargador de batería averiados

Fuente: Elaboración propia

Por esta razón se ve la necesidad de buscar alternativas para reducir el impacto producido por las transferencias o eliminarlas.

2.10 Análisis del retardo de tiempo en transferencias a nivel de 13,8kV

Existen retardos de tiempo ocasionados por la transferencia de fuentes cuando una unidad generadora entra o sale de servicio. De igual manera, se observó que el mayor retardo se produce en el momento de cierre del



interruptor de acople 52-BSM12, (ver **ANEXO 5** - ANALISIS DEL RETARDO EN TRANSFERENCIAS).

Así se puede concluir que los tiempos de retardo de los interruptores están en función de otras variables y condiciones previas que deben ser verificadas antes del cierre o apertura del mismo, razón por la cual no es factible reducir los tiempo de cierre de interruptores. (Ver **ANEXO 6** - DIAGRAMAS LÓGICOS).



CAPÍTULO 3

PLANTEAMIENTO DE ALTERNATIVAS

3.1 Introducción

Si se analiza los diferentes tipos de centrales y principalmente, las fuentes de energía que se utilizan para alimentar los Servicios Auxiliares, se encuentran varias alternativas, incluso dentro de una misma central, por ejemplo: Auto-alimentación para cargas esenciales, alimentación del sistema mediante interruptor de unidad, alimentación directa desde otra central, entre otras. Todo esto encaminado a satisfacer las demandas de alta confiabilidad de los sistemas auxiliares en una central de generación.

A continuación se describe 3 diferentes alternativas de fuentes de alimentación de sistemas auxiliares y la ingeniería que se requiere para implementar en Mazar.

3.2 Sistemas de transferencia utilizados convencionalmente

3.2.1 Auto-alimentación para cargas esenciales

Este tipo de sistema es utilizado en centrales con una alta confiabilidad de alimentación de sus Servicios Auxiliares, ya que consta de una alimentación redundante en sus cargas esenciales para evitar perturbaciones en las unidades generadoras después de una falla en el sistema de alimentación de los Servicios Auxiliares, esta configuración se puede encontrar en la central Molino.

La central Molino consta de un Centro de Fuerza (CFMOL) a 13,8kV que es alimentado desde el bobinado terciario de dos bancos de auto-transformadores: AT1 Y AT2 de 375 MVA cada uno, que sirven para elevar o reducir la tensión entre las bahías de 138 kV y 230 kV en la Subestación Molino (Ver **ANEXO 7 - CENTRO DE FUERZA MOLINO**).

El centro de fuerza Molino consta de dos barras J y K acopladas mediante el interruptor 752-JK, como se puede apreciar en la fig. 21

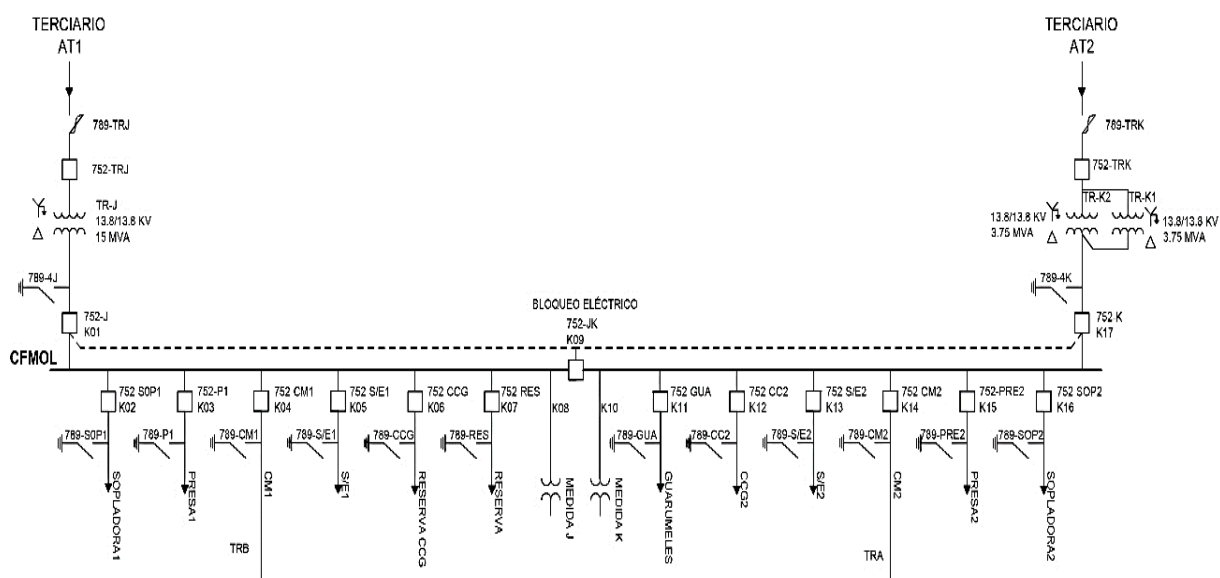


Figura 21: Centro de fuerza de la central Molino

Fuente: CELEC E.P. HIDROPAUTE

Las cargas conectadas a la barra J son:

- Sopladora 1
- **Presa 1**
- CM1 (Casa de máquinas 1)
- S/E 1 (Subestación 1)

- CCG (Centro de control de generación)
- Reserva

La barra K consta de las siguientes cargas;

- Sopladora 2
- **Presa 2**
- CM1 (Casa de máquinas 2)
- S/E 1 (Subestación 2)
- CCG (Centro de control de generación)
- Guarumales

Las cargas pueden ser alimentadas mediante cualquiera de los auto-transformadores. Los Servicios Auxiliares de casa de máquinas están alimentados a través de dos transformadores: TRA y TRB, reduciendo así la tensión de 13,8kV a 480V para alimentar al Centro de Fuerza de Casa de Máquinas (CFCM) como se ilustra en la fig. 22.

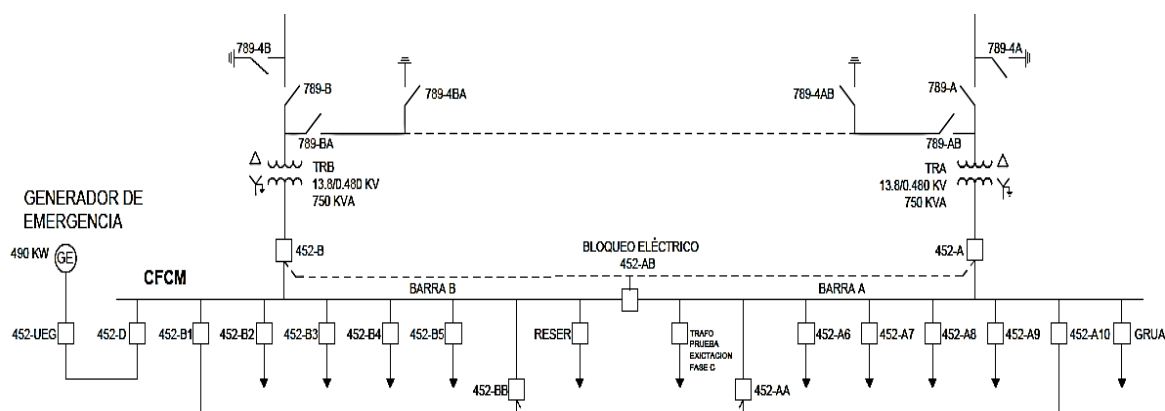


Figura 22: Centro de fuerza de casa de máquinas de la central Molino

Fuente: CELEC E.P. HIDROPAUTE

El centro de fuerza de casa de máquinas consta de dos barras (A y B), acopladas mediante el interruptor 452-AB, el cual permite obtener una mayor confiabilidad en el sistema.

En caso de que TRA saliera de servicio, la demanda total será atendida por TRB y viceversa, cerrando el acople entre las barras A y B.

Los Servicios Auxiliares se dividen en cargas no esenciales y cargas esenciales, siendo los primeros alimentados únicamente de las barras A y B, encontrándose conectados a una barra seccionada CCCM con su respectivo interruptor de acople (452-ST), como se puede ver en la fig. 23.

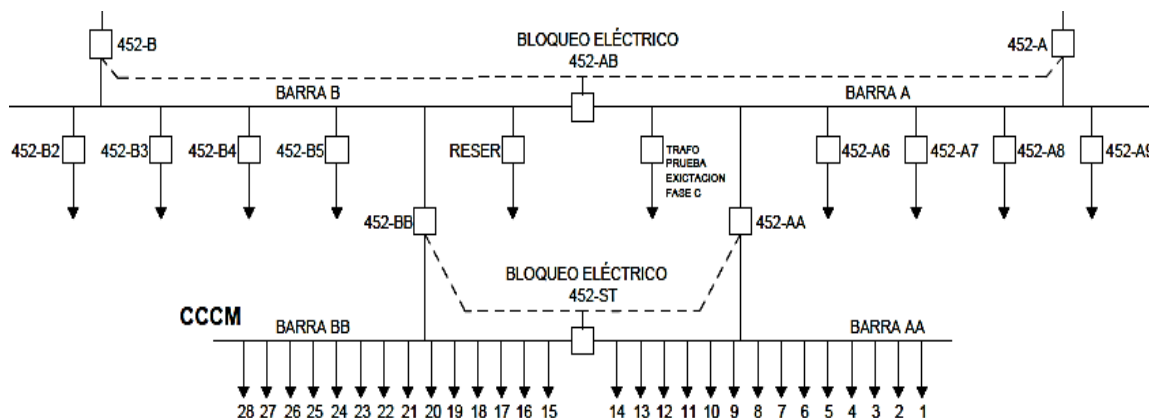


Figura 23: Cargas no esenciales conectadas al centro de fuerza

Fuente: CELEC E.P. HIDROPAUTE

Por otra parte, los Servicios Auxiliares esenciales del Centro de Carga de Unidad (CCU) se alimentan desde el CFCM cuando los generadores están fuera de servicio, y a través de un transformador de 315kVA de potencia cuando la unidad entre en operación (auto - alimentación), transfiriendo así la carga mediante la interacción de los interruptores 452-A y 452-B, como se muestra en la fig. 24.



Paúl Arévalo - Javier Benavides



Las cargas esenciales serían auto-alimentadas desde los generadores suponiendo que estos se encuentren en servicio, para esto es necesario reducir la tensión de 13,8kV a 480V mediante un transformador de unidad (TU) con iguales características que los transformadores TSA ya instalados, estos nuevos transformadores deberán estar instalados a la salida de cada generador. En caso de que los generadores se encuentren fuera de servicio, las cargas esenciales de las Unidades (CCMU1, CCMU2 y CCMDD (BWR3- SAE)) deberán alimentarse desde el centro de carga TDCM.

Por otro lado, es necesario alimentar constantemente el centro de fuerza TDSM a través de las líneas de transmisión LTM1 y LTM2, con el fin de evitar transferencias a nivel de 13,8kV.

En este caso, sería factible utilizar transformadores de aislamiento galvánico (TAGM1 y TAGM2), para así regular la tensión en las líneas LTM1 y LTM2 a límites permisibles mediante su LTC (Load Tap Changer) o cambiadores de toma bajo carga, y aprovechar las ventajas de un aislamiento galvánico, (ver **ANEXO 8 - MAZAR ALT-1**).

Ventajas y Desventajas de Auto-alimentación para cargas esenciales.

Ventajas:

- Disminuye el impacto producido por las transferencias, efectuándolas en los tableros de cargas esenciales de cada unidad a nivel de 480V.
- Elimina transferencias en 13,8kV.



- En caso de pérdida de las fuentes, las cargas esenciales serían alimentadas por los generadores, evitando el disparo⁶ de las unidades y aumentando la confiabilidad del sistema.

Desventajas:

- Alto costo de equipos y mano de obra.
- Las cargas no esenciales tendrían menor confiabilidad debido a que se alimentarían únicamente de la red de 13,8kV proveniente de Molino, y si no se contara con esta fuente, se alimentarían del generador de emergencia.
- Se requiere de un nuevo estudio de protecciones, para identificar el comportamiento de las corrientes de cortocircuito al realizar el cambio de topología de la red y los efectos de colocar nuevos elementos.

3.2.3 Interruptor de Unidad.

Esta metodología de alimentación a los auxiliares eléctricos de una planta, es muy usual y segura. Entre las centrales del SNI que cuenta con esta topología en sus auxiliares esta la central San Francisco de Hidroagoyan y la central Sopladora de Hidropaute, que se encuentra en construcción, y que por fines ilustrativos se tomará como ejemplo. (Ver **ANEXO 9** - CENTRO DE FUERZA SOPLADORA).

⁶ Disparo: Desconexión brusca del generador

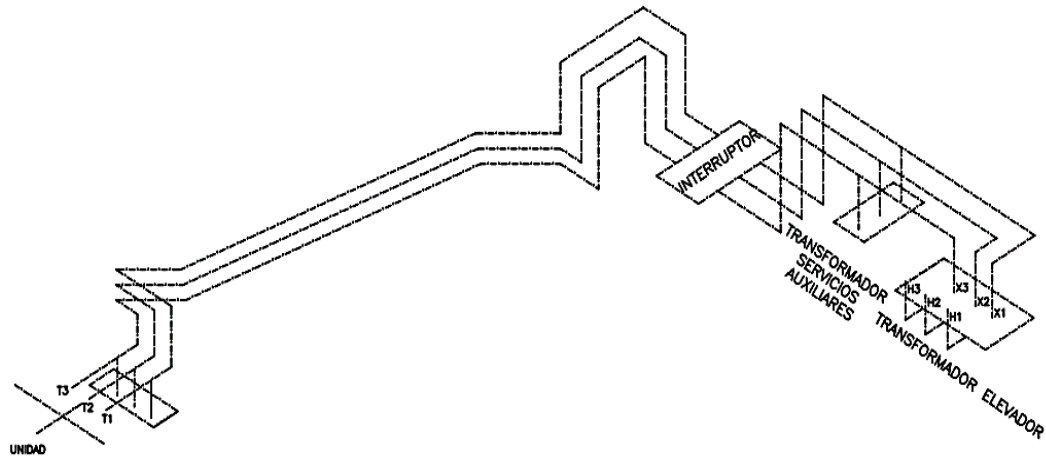


Figura 25: Sistema con interruptor de unidad

Fuente: CELEC E.P. HIDROPAUTE

La central Sopladora está constituida de varias fuentes de alimentación para los Servicios Auxiliares, una de ellas es el centro de distribución de 13,8kV, que consta de dos tableros similares TDMP1 y TDMP2 cada uno con cuatro celdas de media tensión como se muestra en la fig. 26, siendo:

- El sistema de 13,8kV proveniente de la central Molino,
- La interconexión con el transformador de Servicios Auxiliares de casa de máquinas,
- Una reserva y
- La interconexión con el transformador de Servicios Auxiliares del patio de maniobras TES1 y TES2.

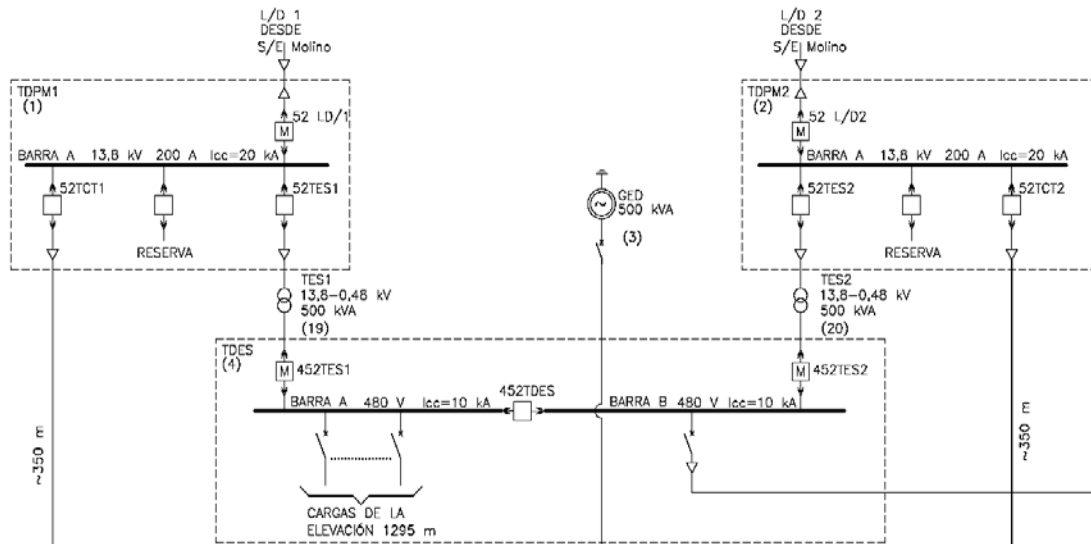


Figura 26: Centro de fuerza Sopladora 13,8kV

Fuente: CELEC E.P. HIDROPAUTE

Este sistema de Servicios Auxiliares presenta una configuración de doble barra (A y B) con las siguientes prioridades de fuentes:

- Fuente preferencial:** proveniente del transformador auxiliar de la unidad de generación, que se conecta a las barras de fases aisladas entre el interruptor del generador y el transformador elevador. Esta fuente posibilita la alimentación de los Servicios Auxiliares a partir del generador o a partir del sistema de 230 kV, con la unidad parada y el interruptor 52-G1 abierto;
- Primera fuente de respaldo:** proveniente del transformador auxiliar de la unidad de generación N° 2, similar a la fuente de la unidad de generación N° 1;

- c) **Segunda fuente de respaldo:** proveniente de los transformadores TCT1 y TCT2, conectados a las barras A y B que son alimentadas desde la central Molino;
- d) **Fuente de emergencia:** en el caso de pérdida de las tres fuentes ya mencionadas, se cuenta con un grupo de emergencia a diésel.

Como se ha descrito en los literales a y b, el sistema de Servicios Auxiliares posee fuentes internas provenientes de las unidades de generación y fuentes externas provenientes del sistema de 230 kV o de la red de 13,8 kV de la central Molino (fig. 27).

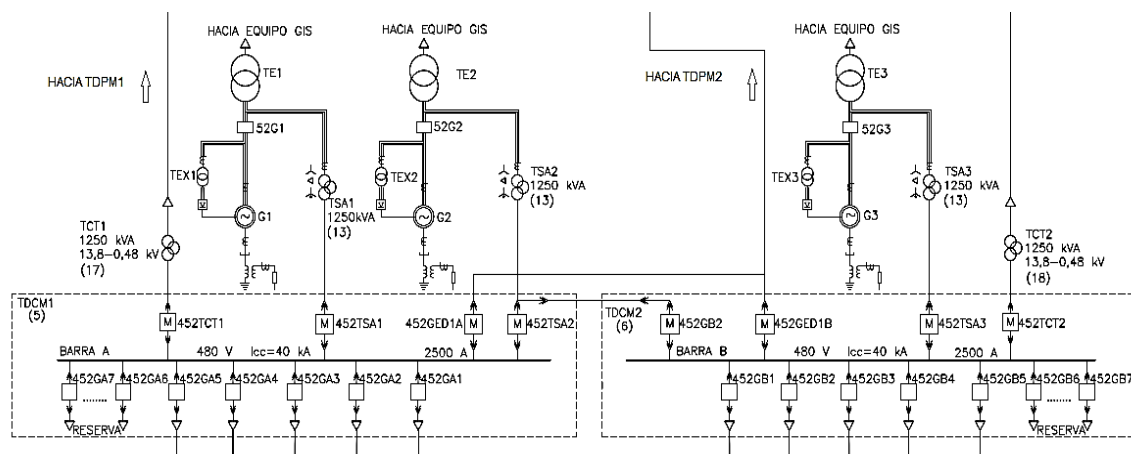


Figura 27: Alimentación desde sus propias unidades y del sistema

Fuente: CELEC E.P. HIDROPAUTE

La transferencia de fuentes será ejecutada de manera abierta, evitando el paralelismo de fuentes a través de enclavamientos tanto eléctricos como mecánicos en los interruptores.

En condiciones normales de operación, los transformadores de Servicios Auxiliares denominados TSA1, TSA2 y TSA3 serán alimentados por medio de una derivación ubicada entre el interruptor de unidad 52-G y el transformador



elevador de cada unidad. De esta manera, estos transformadores son considerados como una fuente conectada a las unidades de generación o al sistema de 230 kV a través del transformador elevador, lo que la caracteriza como una fuente de alta confiabilidad.

Mediante el transformador TSA1, se alimentará la barra A del tablero de distribución TDCM1. De la misma manera, el secundario del transformador TSA3 alimentará la barra B del tablero de distribución TDCM2. Así, la unidad 1 es la fuente normal prioritaria para la barra A y la unidad 3 es la fuente normal prioritaria para la barra B (fig. 27).

El transformador TSA2, podrá alimentar como respaldo las barras A y/o B de los tableros TDCM1 y TDCM2 respectivamente. Desde las barras A y B se alimentarán a todos los centros de cargas de casa de máquinas y a los tableros de distribución de 13,8 kV (fig.27).

Mediante los tableros: TDPM1 y TDPM2, se podrá energizar el tablero de distribución de 480V del edificio de servicios (fig. 26).

En caso de pérdida de las fuentes provenientes de las unidades de generación y del sistema de 230 kV, los tableros TDCM1 y TDCM2 serán alimentados desde la red de 13,8 kV proveniente de Molino.

El flujo de energía en el circuito entre los tableros de distribución de casa de máquinas y del patio de maniobras podrá ser de dos sentidos dependiendo de la disponibilidad de las fuentes. Si se produjera una desconexión total ("Black-out") con pérdida del sistema de 230 kV, el grupo de emergencia a diésel



entraría en operación para alimentar las cargas esenciales de la central y garantizar la seguridad en la parada de las unidades.

Para permitir que el grupo de emergencia entre en operación en la condición de “Black-out”, una función de alivio de carga será prevista para desconectar las cargas que no son esenciales, en los diversos centros de carga.

Los circuitos de arranque de las unidades de generación, serán dotados de funciones que permitan restablecer las condiciones de arranque de los motores de la unidad de generación escogida para arrancar en la situación de “Black-start”⁷ [18].

3.2.4 Interruptor de Unidad central Mazar

Esta configuración se podría aplicar a la central Mazar considerando lo siguiente:

Se necesitaría principalmente dos interruptores de unidad 52-G1 y 52-G2, los cuales estarían ubicados a la salida de las unidades generadoras G1 y G2 respectivamente a nivel de tensión de 13,8kV; logrando así la siguiente configuración.

- a) **Fuente preferencial:** Proveniente de las unidades generadoras G1 y G2 que alimentan a la barra BSM1 y BSM2 respectivamente con el acople 52-BSM12 abierto.
- b) **Como primera fuente de respaldo,** se tendría alimentación desde el sistema a través del transformador elevador 1 (TE1) para la barra BSM1 y del

⁷ Un arranque en negro o blackstart, es el proceso de restauración de una central eléctrica para el funcionamiento sin depender de la red externa de transmisión de energía eléctrica.



transformador elevador 2 (TE2) para la barra BSM2 con el interruptor de acople abierto.

c) **La segunda fuente de respaldo** proveniente de las líneas LTM1 y LTM2 de la red de 13,8kV de la central Molino.

d) **Fuente de emergencia**, en el caso de no contar con las fuentes ya mencionadas: generador de emergencia a diésel, que alimenta el centro de fuerza.

En condiciones normales de operación, los interruptores de acople 52-BSM12 y 52-BSA12 estarían normalmente abiertos, en caso de pérdida de tensión en una de las acometidas, el interruptor de esta acometida abrirá y el interruptor de acoplamiento cerrará, con la condición de que no exista falla en las barras. (Ver **ANEXO 10 - MAZAR ALT-2**).

Ventajas:

- Mayor confiabilidad al depender de varias fuentes, entre ellas el SNI.
- No se produce transferencias en condiciones normales de operación.

Desventajas:

- Altos costos en equipos y mano de obra.
- Al ser un interruptor robusto se necesita un mayor espacio para su instalación.
- Se necesita hacer un re-diseño de ingeniería para la ubicación del interruptor y recorrido de las barras blindadas.



- Mayor dificultad en operación y mantenimiento al tener demasiadas fuentes de energía.
- Se requiere realizar un estudio de protecciones, para identificar el comportamiento de las corrientes de cortocircuito al realizar el cambio de topología de la red y los efectos de colocar nuevos elementos y la influencia de fallas del SNI.

3.2.5 Alimentación directa desde otra central

Para ciertas centrales, se prevé la alimentación normal de los Servicios Auxiliares a partir de la línea de media tensión proveniente desde otra central que se encuentre relativamente cerca, este esquema de suministro como se describirá, es el más sencillo y el más económico.

Un problema que resulta evidente es la suspensión de energía, ya que, si se presenta un problema en la central de origen, este se verá reflejado directamente en la central de carga, por eso es necesario contar con un grupo electrógeno [19].

3.2.6 Alimentación directa hacia la central Mazar desde la central Molino

Usar esta configuración en la central Mazar implica eliminar las transferencias realizadas constantemente en el centro de fuerza de 13,8kV, usando como fuentes preferenciales las líneas provenientes de la central Molino al mismo nivel de tensión, como primera fuente de respaldo las unidades generadoras y como fuente de emergencia el grupo a diesel. (Ver **ANEXO 11 - MAZAR ALT-3**)

Ventajas:

- Simplicidad de re-diseño.

- Costos relativamente bajos.
- Elimina transferencias a nivel de 13,8kV.

Desventajas:

- La confiabilidad de los auxiliares depende principalmente de la confiabilidad de las líneas, se requiere realizar un análisis de confiabilidad.
- El sistema está sujeto a variaciones de tensión.
- Es posible que se requiera aumentar el tiempo de mantenimiento en las líneas para que no se vea afectada la alimentación de auxiliares.
- El perfil de tensión de los auxiliares de Mazar lo rige el comportamiento del SNI, ya que su alimentación de las líneas Molino – Presa – Mazar se alimenta desde los ATs de Molino.
- Se requiere cambiar la lógica de conmutación en SCADA.

Para mitigar las variaciones de tensión en la línea de transmisión de 13.8 kV, una opción sería instalar transformadores con cambiadores de taps bajo carga en cada circuito. En este caso se podría utilizar transformadores con aislamiento galvánico para una mayor seguridad en la instalación, como se muestra en la siguiente figura.

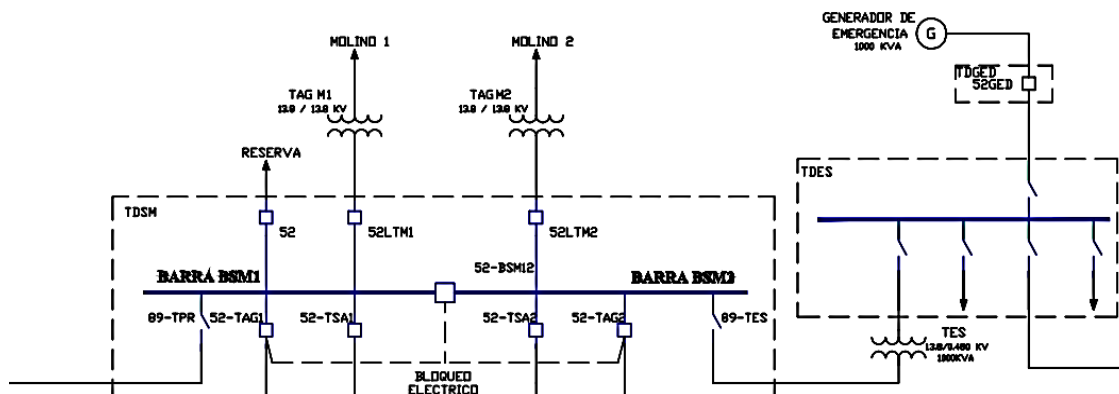




Figura 28: Regulación de tensión en LTM1 y LTM2

Fuente: CELEC E.P. HIDROPAUTE

En resumen, se han analizado tres alternativas que técnicamente pueden ser factibles aplicar en la central Mazar, describiendo las principales ventajas y desventajas buscando eliminar o disminuir el número de transferencias, facilitar la operación y maniobras de conmutación al realizar mantenimientos, considerando el restablecimiento de alimentación al generarse un apagón todo esto basados en criterios técnicos y particularidades propias de la central, con el fin de elegir la alternativa más viable, que será analizada en el siguiente capítulo.



CAPÍTULO 4

ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS

4.1 Introducción

En función a las alternativas planteadas en el capítulo anterior para la alimentación de los Servicios Auxiliares, se consideran dos de ellas para su justificación técnica basados en criterios de alta confiabilidad de suministro y en el menor impacto posible en el sistema actual instalado.

4.2 Alternativa N° 1 - Alimentación desde otra central

Para realizar este estudio es fundamental conocer ciertos parámetros del sistema de alimentación proveniente de otra central (Molino), con el fin de determinar la confiabilidad del sistema, caída de tensión y nueva lógica del sistema SCADA, para así garantizar el correcto funcionamiento del propuesto diseño. (Ver **ANEXO 12** – UNIFILAR MAZAR ALT1).

4.2.1 Levantamiento de parámetros

El centro de fuerza de la central Molino se interconecta con la presa Daniel Palacios mediante dos líneas de transmisión denominadas Presa 1 y Presa 2. El nivel de tensión, la distancia entre fases y el tipo de conductor que se utilizó se presenta a continuación.

Tabla N° 17 (a): Línea de interconexión Molino – Presa Daniel Palacios

Línea Presa 1	
Estructura	AR
Distancia	7 km
Conductor Fase	300 ACAR



Línea Presa 1	
Conductor Hilo de Guarda	OPGW35E44z
Sistema	Trifásico doble circuito
Tensión	13,8kV
Potencia	8 MVA

FUENTE: Tesis “Estudio para la coordinación de protecciones”, Jose Mejia – Andres Ollague

Tabla N° 17 (b): Línea de interconexión Molino – Presa Daniel Palacios

Línea Presa 2	
Estructura	AR
Distancia	7 km
Conductor Fase	300 ACAR
Conductor Hilo de Guarda	OPGW35E44z
Sistema	Trifásico doble circuito
Tensión	13,8kV
Potencia	8 MVA

FUENTE: Tablas (a) y (b). Tesis “Estudio para la coordinación de protecciones”, Jose Mejia – Andres Ollague

Existen cargas que se alimentan desde el Centro de Fuerza de la Presa como la Presa Daniel Palacios, Draga, Campamentos Arenales y Peñas Coloradas y Cantera Rio Negro, es por ello que el suministro hacia Mazar tiene esta derivación, para completar con la interconexión hacia Mazar existe una línea de transmisión a doble circuito desde la Presa ya mencionada hacia Mazar como se muestra a continuación. (Ver **ANEXO 13 – MOLINO PRESA**)

Tabla N° 18 (a): Línea de interconexión desde la barra Presa Daniel Palacios - Mazar

Línea Molino 1	
Estructura	AR
Distancia	7,2 km
Conductor Fase	300 ACAR
Conductor Hilo de Guarda	OPGW35E44z
Sistema	Trifásico doble circuito
Tensión	13,8kV
Potencia	1,5 MVA

FUENTE: Tesis “Estudio para la coordinación de protecciones”, Jose Mejia – Andres Ollague

Tabla N° 18 (b): Línea de interconexión desde la barra Presa Daniel Palacios - Mazar

Línea Molino 2	
Estructura	AR
Distancia	7,2 km
Conductor Fase	300 ACAR
Conductor Hilo de Guarda	OPGW35E44z
Sistema	Trifásico doble circuito
Tensión	13,8kV
Potencia	1,5 MVA

FUENTE: Tesis "Estudio para la coordinación de protecciones", Jose Mejia – Andres Ollague

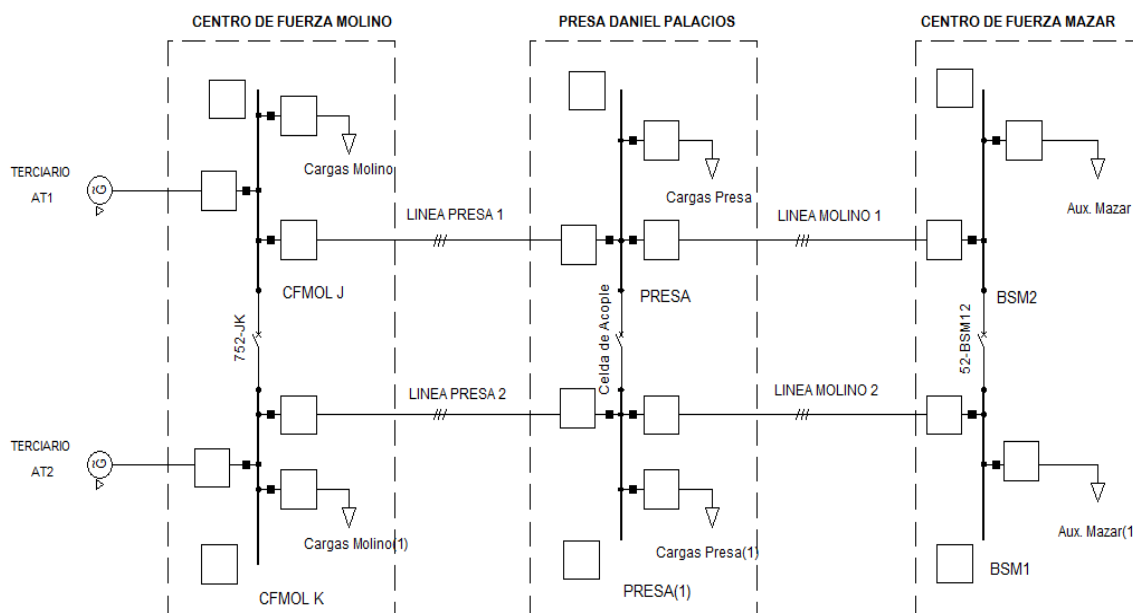


Figura 29: Sistema Molino-Presa-Mazar.

Fuente: Elaboración propia

Mediante estos parámetros se determinara la impedancia característica de las líneas considerando la siguiente disposición:

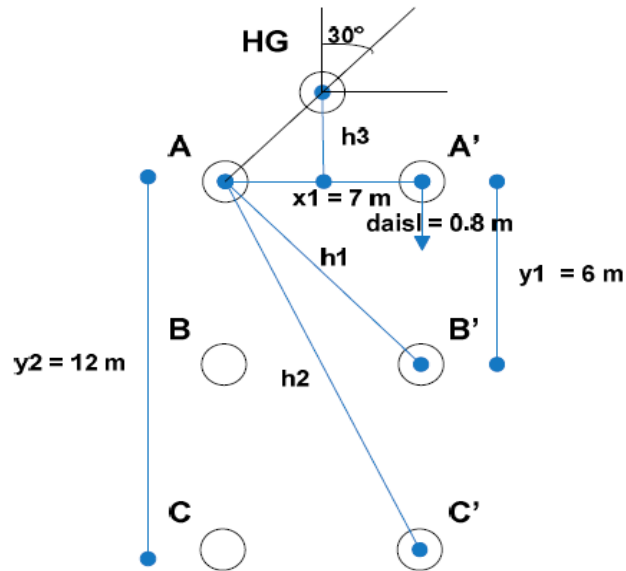


Figura 30: Disposición Geométrica Estructura AR.

FUENTE: Tesis "Estudio para la coordinación de protecciones", Jose Mejia – Andres Ollague

La impedancia de la línea se la obtiene mediante el método de reducción de Kron, considerando impedancias propias y mutuas de los circuitos.⁸

$$Z_{LÍNEA} = 0.1 + j0.276 \frac{\Omega}{km} \quad (1)$$

Para realizar el cálculo de caída de tensión de las líneas también es necesario conocer la potencia y corriente que circulan por los conductores, para ellos se realizó varias mediciones con el fin de estimar un promedio con el cual se pueda realizar el análisis.

⁸ Tesis "Estudio para la coordinación de protecciones", Jose Mejia – Andres Ollague

Tabla N° 19 (a) y (b): Mediciones en el Centro de fuerza de Mazar.

(a)

LT Presa 1	
VL12	12,95 kV
VL23	13,01 kV
VL31	12,97 kV
IL1	7,4 A
IL2	7,7 A
IL3	7,5 A
S	0,17 MVA
P	0,15 MW
Q	0,07 MVAR
Cos	0,9
f	60,03 Hz

(b)

LT Presa 2	
VL12	12,97 kV
VL23	13,04 kV
VL31	12,99 kV
IL1	5,6 A
IL2	5:00 AM
IL3	5,4 A
S	0,12 MVA
P	0,12 MW
Q	0,01 MVAR
Cos	1
f	59,98 Hz

Fuente: Elaboración propia.

4.2.2 Cálculo de caída de tensión

La circulación de corriente a través de un conductor, ocasiona una pérdida de potencia transportada por el cable y por tanto una caída de tensión o diferencia de potencial entre los extremos del conductor. Este valor se mide en voltios y representa el gasto de fuerza que implica el paso de la corriente por el mismo, la caída de tensión también se mide en tanto por ciento de la tensión nominal de la fuente que alimenta el circuito, ésta deberá estar por debajo de los límites establecidos por el reglamento de cada instalación, con el objetivo de garantizar el buen funcionamiento de los receptores alimentados por el cable [21].

No existe un conductor con resistividad igual a cero, por muy pequeña que sea siempre existirá una resistencia al paso de la corriente la cual es mayor a medida que la longitud conductor se incrementa. La caída de tensión en un conductor viene dada por el nivel de resistencia del mismo, ésta debido al

material del mismo, la carga prevista en el extremo más lejano del circuito y del tipo de tensión que se aplicará en los extremos [21].

Independientemente de la carga que se encuentre conectada a la línea de transmisión, debe conservarse los límites de operación permitidos, por lo que el criterio de caída de tensión se establece para los extremos de la línea y se relaciona directamente con su capacidad de suministro de potencia reactiva, para ello se realiza un estudio propio de la línea que conecta el centro de fuerza Molino con la presa Daniel Palacios y de la línea que conecta la misma presa con el centro de fuerza Mazar mediante un circuito que represente una línea corta ya que la distancia hasta el punto de carga es menor a 80km [21].

El planteamiento matemático que se expone es independiente del material del conductor (aluminio, aleación de aluminio o cobre).

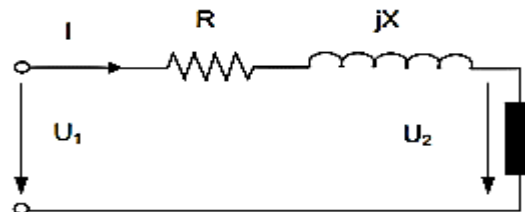


Figura 31: Circuito equivalente de una línea corta.

Fuente: Guía técnica de aplicación – cálculo de caídas de tensión. Edición: sep03. Ministerio de Ciencia y Tecnología.

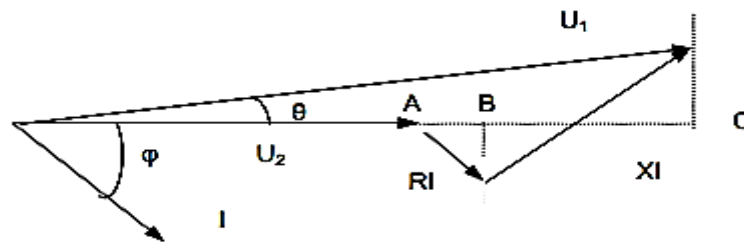


Figura 32: Diagrama vectorial.

Fuente: Guía técnica de aplicación – cálculo de caídas de tensión. Edición: sep03. Ministerio de Ciencia y Tecnología.



Debido a que el ángulo φ es pequeño, se puede asumir que el vector $U'1$ es igual a su proyección horizontal, siendo por tanto el valor de la caída de tensión.

Sabiendo que la potencia transportada a través de la línea es:

$$P = \sqrt{3} * U'1 * I \cos\varphi \quad (\text{Circuito trifásico})$$

$$\Delta U = U'1 - U2 \cong AB + BC = RI \cos\varphi + XI \sin\varphi$$

La caída de tensión se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$\Delta_v = \frac{P * L}{U'1} (RL + XL * \tan\varphi)$$

Donde:

P: Potencia a transportar en kW .

$U'1$: Tensión de la línea en kV .

L: Longitud de la línea en km .

RL: Resistencia del conductor en $\frac{\Omega}{km}$

XL: Reactancia del conductor en $\frac{\Omega}{km}$

La reactancia, X, de los conductores varía con el diámetro y la separación de los mismos [21].

Según los datos medidos en el centro de fuerza Mazar, tablas 18 y 19 se obtiene la caída de tensión de las líneas: presa Daniel Palacios – Mazar.

Circuito Molino 1

$$\Delta_v = \frac{150 * 7,2}{13,01} (0,1 + 0,276 * \tan(\cos^{-1}(0,9))) = 19,3979 \text{ voltios}$$

$$\% \Delta_v = \frac{18,2874}{13800} * 100 = 0,13\%$$

Circuito Molino 2

$$\Delta_v = \frac{120 * 7,2}{13,8} (0,1 + 0,276 * \tan(\cos^{-1}(0,9))) = 14,63 \text{ voltios}$$



$$\% \Delta_v = \frac{14,63}{13800} * 100 = 0,11\%$$

Ya que la caída de tensión se mantiene por debajo de los niveles máximos permitidos por la norma se puede justificar que es un sistema propicio para alimentar cargas inductivas y reactivas, en este análisis se ha considerado únicamente parámetros inductivos ya que la mayoría de las cargas son motores eléctricos.

Caída de tensión admisibles (En el punto más alejado) [27]

- En la red de media tensión:

- Área Urbana: 3%

- Área Rural: 5%

- En la red de baja tensión:

- Área Urbana: 6%

- Área Rural: 4,5%

- En las acometidas: 1%

4.2.3 Cambio de lógica de transferencia del SCADA

La lógica establecida de los servicios auxiliares para cerrar un interruptor tiene un orden secuencial de tres etapas: posibilidad de cierre, habilitar el cierre y finalmente cerrar interruptor (fig. 33). Cada una de estas etapas requiere de condiciones previas para su activación. (**ANEXO 6** - DIAGRAMAS LOGICOS).

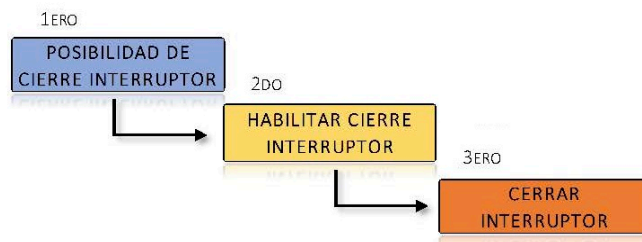


Figura 33: Orden secuencial de diagramas lógicos.

Fuente: Elaboración propia.

Para establecer la nueva configuración en los esquemas lógicos se debe cambiar el orden prioritario de transferencia de fuentes.

- a) Mediante las líneas provenientes de la central Molino alimentarían las barras BSM1 y BSM2 con el interruptor de acople abierto. En caso de que solo una línea esté disponible, esta alimentaría las dos barras con el interruptor de acople cerrado.
- b) Suponiendo que las fuentes normales de Molino no estén disponibles y las unidades de generación en reposo, el Grupo Diésel entraría en operación para energizar las barras BSM1 y BSM2, de esa manera las unidades podrían entrar en operación y suplir sus propias cargas.

En base a lo expuesto, para poder realizar esta configuración es necesario cambiar la prioridad la alimentación proveniente de las unidades generadoras y mantener abiertos los interruptores 52-TAG1 y 52-TAG2 evitando la transferencia de fuentes.

Una desventaja en este sistema es que la confiabilidad disminuye al depender de menos fuentes de alimentación, si se produjese una falla en la línea de alimentación LTM1 y/o LTM2 y al estar en operación las unidades generadoras los interruptores 52-LTM1 y/o 52-LTM2 se abren y se cierra

inmediatamente la alimentación de una o las dos unidades en caso de estar generando, en este caso de que las unidades se encuentren en reposo arrancaría GED para suplir las cargas esenciales. En el caso de falla de una sola línea LTM1 o LTM2 se procedería al cierre del acople 52-BSM12 para que la línea no fallada alimente a todo el sistema de S.A.

En los diagramas lógicos de las figuras 34 y 35, la lógica de apertura de los interruptores 52-LTM1 y 52-LTM2 depende de una condición en la cual cada interruptor 52-TAG1 y 52-TAG2 debe tener la posibilidad de cierre activada respectivamente.

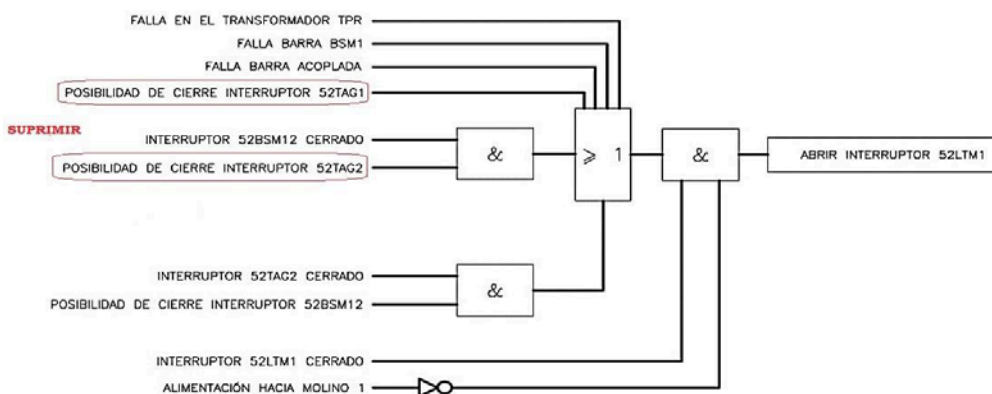


Figura 34: Diagrama lógico para la apertura del interruptor 52-LTM1

Fuente: CELEC EP HIDROPAUTE

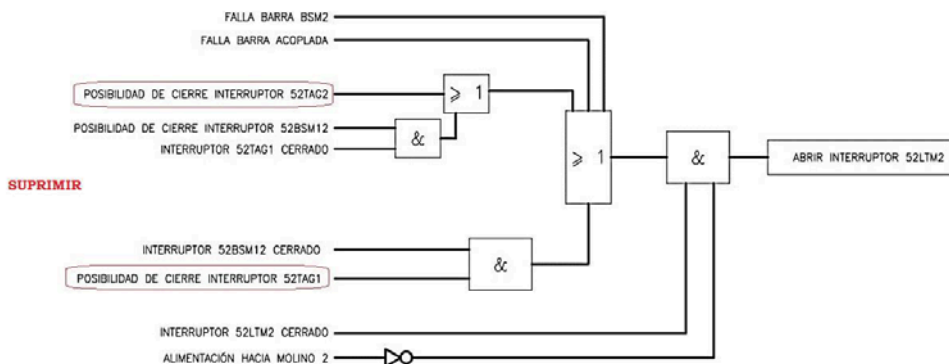


Figura 35: Diagrama lógico para la apertura del interruptor 52-LTM2

Fuente: CELEC EP HIDROPAUTE

Cambiando la prioridad de las fuentes de alimentación desde los generadores se consigue evitar la dependencia que se tiene entre las fuentes provenientes de Mazar y Molino, así eliminando la transferencia de fuentes cuando las unidades ingresen y salgan de operación.

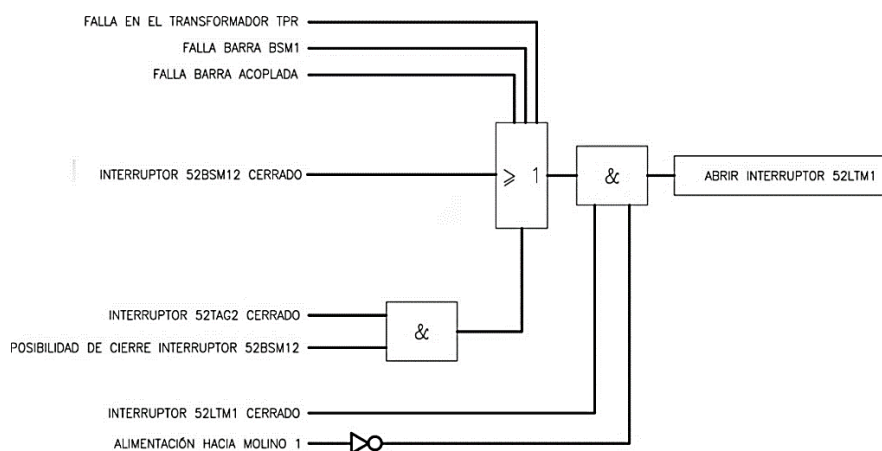


Figura 36: Diagrama lógico modificado para la apertura del interruptor 52-LTM1

Fuente: Elaboración propia

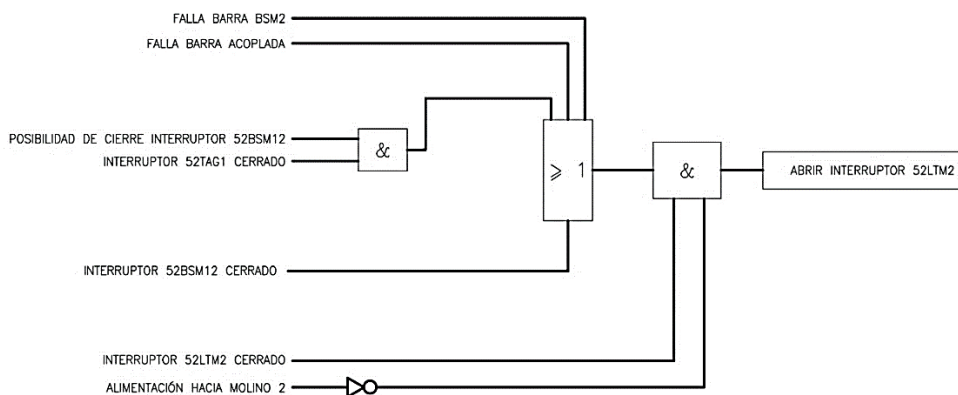


Figura 37: Diagrama lógico modificado para la apertura del interruptor 52-LTM2

Fuente: Elaboración propia



4.2.4 Estudio de confiabilidad

Se define como confiabilidad a la probabilidad para que un aparato o sistema funcione sin fallar durante un período de tiempo especificado.⁹

Los elementos que conforman un sistema eléctrico de potencia (SEP) están continuamente expuestos a fallos y perturbaciones que afectan la continuidad del servicio, no es posible tener un SEP 100% confiable ya que los fallos se presentan aleatoriamente, pero, se puede reducir la probabilidad de ocurrencia mediante inversiones en planificación y expansión, para analizar la confiabilidad de un sistema eléctrico se usan técnicas probabilísticas [23].

La confiabilidad se relaciona con la habilidad de un sistema para cumplir correctamente con su función, se puede definir usando dos criterios técnicos como son la adecuación y la seguridad [23]:

Adecuación: Suficiente equipo para satisfacer la demanda de energía eléctrica.

Seguridad: Se define como la habilidad que posee el sistema para responder a disturbios.

VELOCIDAD DE TRANSICION (tasa de fallos) $\lambda(t)$: se refiere al número de transiciones que un componente hace entre el estado de operación y falla [23].

$$\lambda(t) = \frac{\text{\# fallos por unidad tiempo de exposición}}{\text{\# de componentes expuestos al fallo}}$$

⁹ IEEE Std. Dictionary

Tasa de fallas durante la vida de un componente o sistema

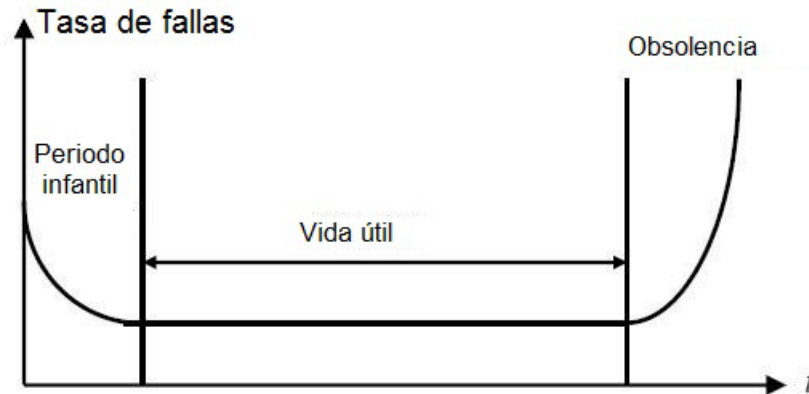


Figura 38: Tasa de fallas de un componente o sistema

Fuente: Confiabilidad en Ingeniería - Carlos J. Zapata

En confiabilidad es común asumir que la tasa de fallas durante la vida operativa de un componente reparable o no reparable sigue la curva en forma de tina (bath-tub) presentada en la fig. 38. Esta curva tiene tres periodos:

Tabla N° 20: Periodos de evolución de la curva

Infantil	Vida útil	Obsolescencia
<p>La tasa de fallas decrece con el tiempo.</p> <p>Las fallas ocurren debido a errores de diseño o fabricación.</p> <p>Una vez se revisa el diseño o se ajusta el componente empieza su vida útil.</p>	<p>La tasa de fallas es constante y tiene el valor más bajo.</p> <p>Las fallas ocurren en forma completamente aleatoria.</p> <p>Entonces, el asumir que un componente tiene tasa de fallas constante implica asumir que está en su vida útil y viceversa.</p>	<p>La tasa de fallas crece con el tiempo.</p>

Fuente: Confiabilidad en Ingeniería - Carlos J. Zapata

Concepto de disponibilidad e indisponibilidad

La fracción del tiempo en la que el elemento está operando correctamente se denomina **DISPONIBILIDAD FORZADA**, y viene dada por: [23]

$$A = \frac{m}{T} = \frac{m}{m + r}$$



MTBF: Mean Time Between Failures (Tiempo medio entre fallas, T) y viene dado por: $T = m + r$

Donde:

MTTF: Mean Time To Failure. (Tiempo medio antes de que ocurra la primera falla, m) y viene dada por:

$$m = \frac{\sum_1^N m_i}{N} = \frac{1}{\lambda}$$

m_i Disponibilidad forzada de cada elemento

N Número de elementos

λ Tasa de fallos

MTTR: Mean Time To Repair. (Tiempo medio para reparar una falla, r) que viene dado por:

$$r = \frac{\sum_1^N r_i}{N} = \frac{1}{\mu}$$

r_i Indisponibilidad forzada de cada elemento

N Número de elementos

μ Tasa de reparación esperada

La INDISPONIBILIDAD FORZADA es la fracción del tiempo en la que el elemento estuvo en el estado de fallo, y viene dada por [23]:

$$U = 1 - A = \frac{r}{T} = \frac{r}{m + r}$$

Cuando se analiza la confiabilidad del sistema de generación se asume que el sistema de transmisión es adecuado para transportar la energía hasta su destino, sin embargo la confiabilidad en un punto de carga no depende solamente del sistema de generación, sino también del sistema de transmisión



y en casos hasta de las barras de conexión entre los dos sistemas antes mencionados.

Cuando se considera a los sistemas de generación y transmisión se puede producir un fallo de la generación y/o transmisión, es por ello que se debe analizar todo el sistema en conjunto para tener un modelo compuesto en el punto de carga.

Probabilidad condicionada

Si dos eventos A y B ocurren independientemente, la probabilidad de que los dos ocurran simultáneamente viene dada por:

$$P(A \cap B) = P(A) \cdot P(B)$$

Si los dos eventos no son independientes, la probabilidad de que ocurra A una vez que ha ocurrido B, viene dado por:

$$P(A/B) = \frac{P(A \cap B)}{P(B)}$$

La probabilidad de que los dos ocurran simultáneamente:

$$P(A \cap B) = P(A/B) \cdot P(B)$$

Si la ocurrencia de un evento A depende de un número de eventos B_i que son mutuamente excluyentes (no pueden ocurrir simultáneamente) [23]:

$$P(A) = \sum_{i=1}^n P(A/B_i) \cdot P(B_i)$$

En este sistema, se trata de determinar la probabilidad de fallo en la barra de carga (Centro de Fuerza Mazar), para ello los eventos de falla de generación, transmisión y de barras se consideran independientes.



En primer lugar se considera los efectos del sistema de transmisión, el cual consta de dos secciones: la primera es un doble circuito línea presa 1 y 2, la segunda de igual manera está constituida por un doble circuito trifásico línea Molino 1 y 2 antes ya mencionados.

En cada sección hay tres estados posibles:

1. Dos líneas disponibles (2L)
2. Una línea disponible (1L)
3. Cero líneas disponibles (0L)

La probabilidad de fallo en la barra es:

$$P(BF) = P(BF / 2L)P(2L) + P(BF / 1L)P(1L) + P(BF / 0L)P(0L)$$

Estando disponible las dos líneas, se puede producir un fallo en la barra si se producen desconexiones forzadas de la generación mayor que la reserva; o, porque la demanda es mayor que la capacidad de transmisión [23].

Para cada estado de disponibilidad de transmisión existen dos eventos que pueden ocurrir por sí mismos o simultáneamente:

Evento A: desconexión forzada de generación.

Evento B: carga mayor que capacidad de transmisión.

En el caso del sistema presentado el evento B no sería posible, ya que, el dimensionamiento de las líneas supera la capacidad instalada.

En esta metodología, la programación de la generación, usada para el análisis de flujos no es modificada para incluir las desconexiones individuales. A la generación se le trata como una entidad.

Si para determinar el evento B_j consideramos a las unidades individuales conjuntamente con las líneas de transmisión, la programación de la generación es modificada para cada estado de desconexión [23].

$$P(BF_k) = \sum_j [P(B_j)P_{L_j}]$$

B_j es el estado compuesto de generación y transmisión.

Para analizar el sistema de transmisión, se construye primeramente la tabla de capacidades desconectadas, en este caso se considera que la carga es suplida por ambos circuitos de cada sección de transmisión y en caso que uno de ellos deje de funcionar, un solo circuito también será capaz de suplir con toda la demanda.

Para cada circuito se calcula algunos índices de confiabilidad como son:

Tasa anual de fallos, tiempo de duración en estado fallado, etc., para calcular estos índices se procedió a revisar la base de datos de la central Molino.

Tabla N° 21: Línea Molino - presa 1

λ_1	m1	r1	u1	Indisponibilidad	Disponibilidad
0,545454 5	1,833333 3	113,3	77,255	0,007010899	0,992989101

Fuente: Mantenimiento Eléctrico CELEC EP HIDROPAUTE

Tabla N° 22: Línea Molino - presa 2

λ_2	m2	r2	u2	Indisponibilidad	Disponibilidad
0,4545454	2,2	59,06	148,323	0,003055187	0,996944813

Fuente: Mantenimiento Eléctrico CELEC EP HIDROPAUTE

Para calcular la probabilidad del sistema de transmisión tiene que considerarse los estados posibles del sistema:

Tabla N° 23: Estados del sistema

Estado	Línea Presa 1	Línea Presa 2
1	Disponible	Disponible
2	Disponible	Indisponible
3	Indisponible	Disponible
4	Indisponible	Indisponible

Fuente: Elaboración propia

Ya que se considera únicamente tres estados, se tienen que sumar los estados dos y tres de la tabla anterior para considerar la desconexión de una de las líneas.

Tabla N° 24: Capacidades desconectadas líneas Molino - presa 1 y 2

Estado	Línea Presa 1	Línea Presa 2	probabilidad
1	0,99694481	0,992989101	0,989955334
2	0,99694481	0,007010899	0,006989479
3	0,00305519	0,992989101	0,003033767
4	0,00305519	0,007010899	2,14196E-05
			1

Fuente: Elaboración propia

Por nomenclatura se considera al sistema de transmisión como L1, entonces, la probabilidad de fallo de cada estado es:

Tabla N° 25: Probabilidad de fallo del sistema de transmisión Molino-Presa

Líneas en estado de fallo	probabilidad
0L1	0,98995533
1L1	0,01002325
2L1	2,142E-05

Fuente: Elaboración propia



A continuación se analiza el sistema de transmisión Presa – Mazar (L2), en el diagrama unifilar consideradas como Línea Molino 1 y 2, el procedimiento es el mismo que para las líneas Presa 1 y 2.

Tabla N° 26: Línea Presa - Mazar 1

$\lambda M1$	m	r(h)	u	Indisponibilidad	Disponibilidad
1,250	0,8	107,25	81,678	0,015073258	0,984926742

Fuente: Mantenimiento Eléctrico CELEC EP HIDROPAUTE

Tabla N° 27: Línea Presa - Mazar 2

$\lambda M2$	m	r(h)	u	Indisponibilidad	Disponibilidad
0,500	2	47,93	182,767	0,002728267	0,997271733

Fuente: Mantenimiento Eléctrico CELEC EP HIDROPAUTE

Tabla N° 28: Capacidades desconectadas líneas Presa - Mazar 1 y 2

estado	elemento1	elemento2	probabilidad
1	0,99727173	0,98492674	0,982239599
2	0,99727173	0,01507326	0,015032134
3	0,00272827	0,98492674	0,002687143
4	0,00272827	0,01507326	4,11239E-05
			1

Fuente: Elaboración propia

Tabla N° 29: Probabilidad de fallo del sistema de transmisión Presa-Mazar

Líneas en estado de fallo	probabilidad
0L2	0,982239599
1L2	0,017719277
2L2	4,11239E-05

Fuente: Elaboración propia

De la misma manera se considera un sistema de generación para los transformadores AT los cuales alimentan el centro de fuerza de Molino



mediante el sistema nacional interconectado, por nomenclatura se conoce como G.

Tabla N° 30: Índices de confiabilidad del transformador AT1

λ_1	m1	r1	u1	Indisponibilidad	Disponibilidad
0,091	11	14,15	619,081	0,000146824	0,999853176

Fuente: Mantenimiento Eléctrico CELEC EP HIDROPAUTE

Tabla N° 31: Índices de confiabilidad del transformador AT2

λ_2	m2	r2	u2	Indisponibilidad	Disponibilidad
0,273	3,667	21,83	401,283	0,000679177	0,999320823

Fuente: Mantenimiento Eléctrico CELEC EP HIDROPAUTE

Tabla N° 32: Probabilidad de fallo del sistema de transmisión AT1 y AT2

Unidades en estado de fallo	probabilidad
0G	0,999174099
1G	0,000825801
2G	9,97193E-08

Fuente: Elaboración propia

Por último se considera el sistema conformado por las barras J y K (B) las cuales han presentado un índice de fallas importante para incluirlos en el estudio de confiabilidad del sistema.

Tabla N° 33: Índices de confiabilidad de la barra J

λ_1	m1	r1	u1	Indisponibilidad	Disponibilidad
0,143	7	52,83	165,815	0,000860804	0,999139196

Fuente: Mantenimiento Eléctrico CELEC EP HIDROPAUTE

Tabla N° 34: Índices de confiabilidad de la barra K

λ_2	m2	r2	u2	Indisponibilidad	Disponibilidad
0,067	15	198,35	44,164	0,001507238	0,998492762

Fuente: Mantenimiento Eléctrico CELEC EP HIDROPAUTE

Tabla N° 35: Capacidades desconectadas barras J y K

Estado	Barra J	Barra K	probabilidad
1	0,9991392	0,99849276	0,997633255
2	0,9991392	0,00150724	0,00150594
3	0,0008608	0,99849276	0,000859507
4	0,0008608	0,00150724	1,29744E-06
			1

Fuente: Elaboración propia

Tabla N° 36: Probabilidad de fallo de las barras J y K

Unidades en estado de fallo	probabilidad
0B	0,997633255
1B	0,002365448
2GB	1,29744E-06

Fuente: Elaboración propia

Para calcular la probabilidad de fallo del sistema, basta con multiplicar la probabilidad de cada estado en el cual la barra de carga no tiene servicio.

Para ello se consideran todas las combinaciones posibles para el cual la barra de carga en la central Mazar se queda sin servicio de energía eléctrica, si bien es un sistema de transmisión independiente de la central, en este estudio se ha considerado todo el sistema desde los AT (autotransformadores) hasta el centro de fuerza de la central Mazar. (Ver **ANEXO 14** - CONFIABILIDAD DEL SISTEMA)

Al concluir el estudio se obtiene una probabilidad de fallo del sistema de:

$$Probabilidad\ de\ fallo = 0,0000865148$$

Por lo tanto el sistema completo tiene una disponibilidad de:

$$Probabilidad\ de\ éxito = 1 - probabilidad\ de\ fallo = 1 - 0,0000865148$$

$$Probabilidad\ de\ éxito = 0,99991349$$



Después de obtener el índice de confiabilidad del sistema, se puede asegurar que la primera alternativa analizada se refiere a un sistema confiable el cual es óptimo para alimentación de cargas críticas.

Cabe aclarar que este análisis de confiabilidad se realizó considerando el tiempo en el que la línea Molino-Presa 2 estaba en correcto funcionamiento. Actualmente aquella línea se encuentra desconectada, únicamente supliendo la demanda a través de la línea Molino-Presa 1, se realizó el estudio de confiabilidad considerando única alimentación por la línea Molino-Presa 1.

$$\text{Nueva probabilidad de éxito} = 0,99167946$$

Como se puede observar el valor de confiabilidad del sistema se altera significativamente, siendo un sistema con un grado de confiabilidad medio, (Ver **ANEXO 14 - CONFIABILIDAD DEL SISTEMA**).

4.2.5 Flujo de Potencia Alternativa 1

Los estudios de flujos de potencia son de gran importancia en la planeación y diseño de la expansión futura de los sistemas de potencia, así como también en la determinación de las mejores condiciones de operación de los sistemas existentes. [28] Principalmente basaremos el problema de caída de tensión de las líneas de Molino donde se presenta las mayores pérdidas, con el fin de corregir este problema.

Este estudio se realizó el programa DlgSILENT (Digital Simulation and Electrical Networks) que utiliza el método de Newton Raphson, para la convergencia del sistema con 25 iteraciones. Los resultados obtenidos en el



sistema actual presentan una caída de tensión menores al 0.95 pu en los tableros de distribución. (Ver **ANEXO 15** - FP MAZAR)

Para corregir este problema se ha optado en instalar 2 transformadores con cambiadores de Tap automáticos colocados entre las líneas LM1 y LM2 y el Centro de Fuerza de Mazar. (Ver **ANEXO 16** - FP MAZAR ALT1)

De esta manera se logró conseguir un nivel de tensión mayor al 0.95 pu establecidos por los límites de regulación de tensión. En la Tabla N° 36 se presenta un resumen de este estudio.

Tabla N° 36: Estudio de Flujos de Potencia caída de tensión alimentación desde Molino

BARRAS	Tensión Nominal (kV)	ANTES		DESPUÉS	
		Tensión (kV)	Tensión (p.u.)	Tensión (kV)	Tensión (p.u.)
TDSM (a)	13,8	12,87	0,93	13,64	0,99
TDSM (b)	13,8	12,93	0,94	13,56	0,98
TDCM (a)	0,48	0,44	0,92	0,47	0,98
TDCM (b)	0,48	0,45	0,93	0,47	0,97
TDTA	0,48	0,45	0,93	0,47	0,98
TDES	0,48	0,45	0,94	0,47	0,98
TDDF	0,48	0,45	0,93	0,47	0,98
TDPS	0,48	0,45	0,93	0,47	0,98
CCMU1	0,48	0,44	0,92	0,47	0,98
CCMU2	0,48	0,45	0,93	0,47	0,97
CCMVAC	0,48	0,44	0,92	0,47	0,97
CCMDD	0,48	0,45	0,93	0,47	0,97
TDCGM	0,48	0,44	0,92	0,47	0,98

Fuente: Elaboración Propia

4.3 Alternativa N°2 Auto - alimentación para cargas esenciales

Como se mencionó en el capítulo 2 el problema de las transferencias radica en que algunos equipos principalmente electrónicos, sufren daños y se ha optado en separar su sistema de alimentación en algunos tableros. Es decir una



alimentación ininterrumpida para todos los tableros a excepción de Centro de carga de motores de las unidades (CCMU1 y CCMU2), en los cuales se puede realizar una transferencia sin problemas cuando las unidades estén en operación, esto es por asuntos de confiabilidad en caso falla de la fuente principal.

En base a la alternativa N°1 (sección 4.2) y considerando mejoras en el sistema se ha definido como segunda alternativa la auto-alimentación para cargas esenciales, esta configuración es establecida en la Central Molino actualmente. (Sección 3.3.1) Para realizar este estudio aplicado a la Central Mazar se requiere algunos cambios en sistema actual, esto conlleva a adquirir nuevos equipos, definir su lugar de ubicación, cambio de sistema actual SCADA y un nuevo estudio de confiabilidad del sistema propuesto.

4.3.1 Cambio de la topología de los S.A.

Para separar alimentación de cargas esenciales se requiere una fuente de alimentación para los tableros CCMU1 y CCMU2, que pueden ser sus propias unidades U1 y U2 respectivamente, esto sería a través de dos transformadores TSAU1 y TSAU2 de 13.8/0.480kV con características similares a los TSA ya instalados en la central. De tal manera se logra que la transferencia se realice únicamente en los tableros CCMU1 y CCMU2 a nivel de 480 V y evitando las transferencias en el centro de fuerza. (Ver **ANEXO 17 - UNIFILAR MAZAR ALT2**)

El sistema de alimentación para los tableros de CCMU1 y CCMU2 actual se muestra en la fig. 39 Los cambios a efectuarse se presentan a continuación y se puede apreciar en la fig. 40.

1. Eliminar la alimentación de los TAGs en el Centro de Fuerza, es decir indisponibles los interruptores 52-TAG1 y 52-TAG2.
2. Instalar dos nuevos transformadores 13.8/0.480kV:
 - 2.1 El TSAU1 entre el reactor RLC1 y el CCMU1,
 - 2.2 El TSAU2 entre el reactor RLC2 y el CCMU2.
3. En CCMU1 cambiar el interruptor 52-E2 por 52-TSAU1.
4. En CCMU2 cambiar y el interruptor 52-E1 por 52-TSAU2.
5. Establecer la nueva lógica de transferencia.

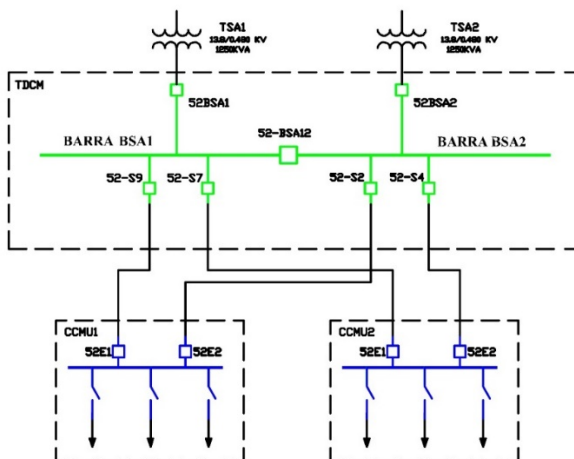


Figura 39: Alimentación actual de los tableros de CCMU1 y CCMU2

Fuente: Elaboración Propia

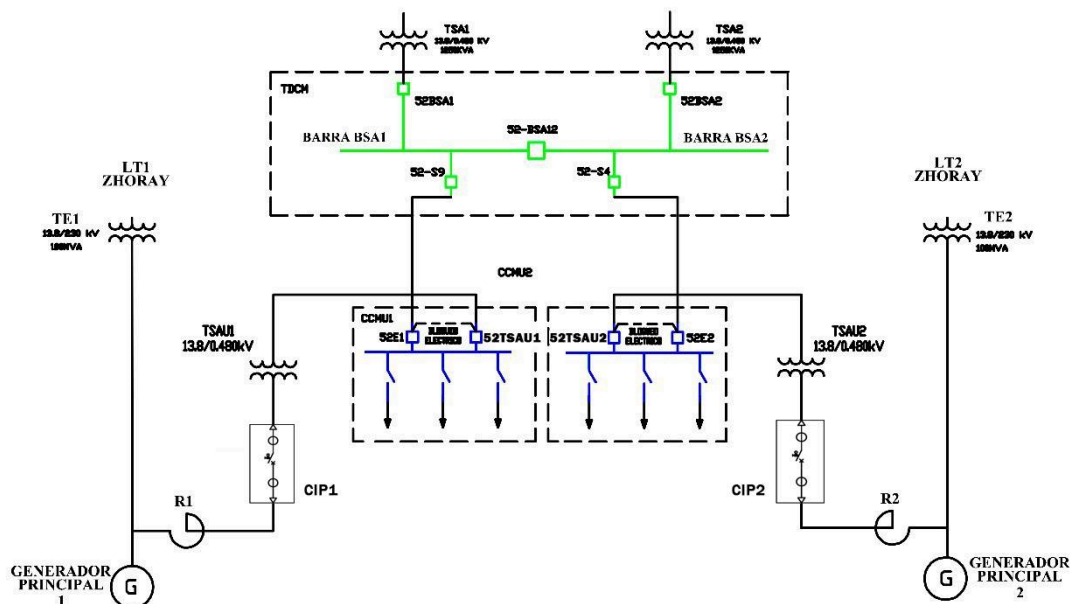


Figura 40: Unifilar Mazar modificado para alternativa 2

Fuente: Elaboración Propia

4.3.2 Cambio de lógica de alimentación SCADA

Para establecer la nueva configuración en los esquemas lógicos se debe suprimir la dependencia de los TAGs en el centro de fuerza y cambia el orden prioritario de transferencia de fuentes en CCMU1 y CCMU2.

La nueva lógica establecida en el centro de fuerza TDSM se presenta de la siguiente manera:

- a) Mediante las líneas provenientes de la central Molino alimentarían las barras BSM1 y BSM2 con el interruptor de acople abierto. En caso de que solo una línea esté disponible, esta alimentaría las dos barras con el interruptor de acople cerrado.



- b) Suponiendo que las fuentes normales de Molino no estén disponibles, el Grupo Diésel entraría en operación para energizar las barras BSM1 y BSM2.

Debido al cambio realizado en la lógica y a la no dependencia de los TAGs en el centro de fuerza se propusieron los cambios los diagramas lógicos de los S.A. de la central. (Ver **ANEXO 18** – DIAGRAMAS LOGICOS ALT2).

Para la alimentación de los Servicios Auxiliares de la unidad, se mantendría la operación del CIP (Cubículo del Interruptor Principal) dentro de la secuencia de arranque de la máquina, al cerrarse este interruptor energizaría el TSAUx, permitiéndose alimentar al centro de carga de la unidad a través de la auto alimentación mediante el generador.

La transferencia de fuentes en el centro de carga de la unidad se realizaría aprovechando de selección de acometida que cuenta el tablero CCMUx, donde la acometida prioritaria sería la que llega desde el generador, con esta propuesta planteada eliminamos la transferencia completa de los Auxiliares en la central y únicamente se la realiza en el centro de carga de cada unidad.

4.3.3 Estudio de confiabilidad del sistema

Si un sistema está conformado por componentes de baja confiabilidad o por un número limitado de ellos es necesario aumentar ese número de componentes creando redundancia en el sistema, de tal manera que, entren en funcionamiento una vez que el componente principal haya fallado.

En un sistema en paralelo un componente necesita trabajar para que el sistema tenga éxito, o todos deben fallar para que el sistema falle ya que es un sistema



redundante. Si se aumenta la redundancia del sistema agregando componentes en paralelo, la confiabilidad del sistema aumenta dependiendo del número de componentes y de la tasa de fallos de los mismos.

Al considerar el nuevo sistema, además de tener la alimentación proveniente de las líneas de Molino, consta de una auto-alimentación desde las propias unidades cuando estas estén en funcionamiento, lo cual aumenta la confiabilidad del sistema al agregar fuentes en paralelo.

Para encontrar la confiabilidad de un sistema con componentes en paralelo, se puede aplicar la ley de la suma de las probabilidades. Por ejemplo, para dos componentes se utiliza la siguiente expresión:¹⁰

$$R_s = R_1 + R_2 - R_1 * R_2$$

Siendo R_1 y R_2 las probabilidades de éxito de los sistemas en paralelo, R_s es la probabilidad de éxito del nuevo sistema. Considerando x como la probabilidad de éxito del sistema de auto-alimentación y conociendo que la probabilidad de éxito del sistema Molino es de 0,99991349 aplicando la fórmula antes vista se tiene que el nuevo valor de confiabilidad del sistema es de

$$R_s = 0,99991349 + x - 0,99991349x = 0,99991349 + 0,00008651x$$

Lo cual demuestra que aumenta la confiabilidad del sistema al agregar nuevas fuentes en paralelo, considerando lógicamente que $x > 0$.

¹⁰ Ingeniería de Confiabilidad, Jorge Acuña Acuña.



4.3.4 Flujo de Potencia Alternativa 2

Para la segunda alternativa no se presenta cambios en cuanto al flujo de potencia, debido a que se mantiene la misma configuración de los TAGM1 y TAGM2.

4.3.5 Calculo de corrientes de cortocircuito

Cuando en un sistema eléctrico de potencia se produce una falla por cortocircuito, el valor de la corriente que circula por la red queda determinado por la fuerza electromotriz de las máquinas conectadas al sistema y por las impedancias entre las máquinas y el punto de falla. [29]

Es por ello que se realizó el estudio en base a la norma IEC 60909 para la configuración actual (Ver **ANEXO 19** - CC TRIFASICO MAZAR y **ANEXO 20** - CC FASE TIERRA MAZAR) y el cambio propuesto (**ANEXO 21** - CC TRIFASICO MAZAR ALT2 y **ANEXO 22** – CC FASE TIERRA MAZAR ALT2), con el fin de verificar el límite de corriente de falla establecido. El cálculo se desarrolló en el programa DIgSILENT para un estudio de corrientes de cortocircuito trifásico.

Norma IEC 60909

Esta parte de la norma establece un procedimiento general, práctico y conciso, que conduce a resultados que generalmente son de precisión aceptable. Para establecer este método de cálculo se introduce una fuente de tensión equivalente en el punto de cortocircuito. En esta parte la norma trata del



cálculo de corrientes de cortocircuito en el caso de cortocircuitos equilibrados o desequilibrados. [30]

Con respecto a la configuración actual y la alternativa 2 planteada el único cambio se presenta en CCMU1 y CCMU2 donde se realizaron las modificaciones correspondientes, se observa la influencia de esta configuración con los generadores y su proximidad con las cargas, este estudio se resumen a continuación.

Datos de Entrada

Tabla N° 36: Generadores G1 y G2

Potencia:	100 MVA
Factor de Potencia:	0,85
Tensión Nominal:	13,8kV
Reactancia Subtransitoria (X''_d):	0,22pu
Reactancia Transitoria (X'_d):	0,31pu
Reactancia Síncrona (X_d):	1,2pu
Secuencia Negativa (X_2):	0,2pu
Secuencia Cero (X_0):	0,091pu

Fuente: CELEC EP HIDROPAUTE

Tabla N° 37: Transformador de Servicios Auxiliares TSA1 y TSA2

Potencia:	1,25 MVA
Tensión Primaria:	13,8kV
Tensión Secundaria:	480V
Grupo de conexión:	Dyn1
Impedancia:	5,67%

Fuente: CELEC EP HIDROPAUTE



Tabla N° 38: Transformador de Servicios Auxiliares TSAU1 y TSAU2

Potencia:	300 kVA
Tensión Primaria:	13,8kV
Tensión Secundaria:	480V
Grupo de conexión:	Dyn1
Impedancia:	5,67%

Fuente: CELEC EP HIDROPAUTE

Tabla N° 39: Transformador de Aislamiento Galvánico TAG1 y TAG2

Potencia:	3,5MVA
Tensión Primaria:	13,8kV
Tensión Secundaria:	13,8kV
Grupo de conexión:	Dyn1
Impedancia:	5,56%

Fuente: CELEC EP HIDROPAUTE

Tabla N° 40: Cables Aislados

Secuencia Positiva y Negativa:	0,10692 + j0,01705 ohms/km
Secuencia Cero:	0,21017 + j0,10369 ohms/km

Fuente: CELEC EP HIDROPAUTE

Tabla N° 41: Transformador del Edificio de Servicios TES

Potencia:	1MVA
Tensión Primaria:	13,8kV
Tensión Secundaria:	480V
Grupo de conexión:	YNyn0
Impedancia:	6,05%

Fuente: CELEC EP HIDROPAUTE

Tabla N° 42: Estudio de Corrientes de cortocircuito trifásico

	ANTIGUO ESQUEMA		NUEVO ESQUEMA	
BARRAS	Potencia de C.C. inicial (MVA)	Corriente de C.C. inicial (kA)	Potencia de C.C. trifásica inicial (MVA)	Corriente de C.C. trifásica inicial (kA)
CCMU1	6,65	7.996	5,06	6,083
CCMU2	6,65	7,994	5,06	6,083

Fuente: Elaboración propia



Tabla N° 43: Estudio de Corrientes de cortocircuito Fase-Tierra

	ANTIGUO ESQUEMA		NUEVO ESQUEMA	
BARRAS	Potencia de C.C. inicial (MVA)	Corriente de C.C. F-T inicial (kA)	Potencia de C.C. F-T inicial (MVA)	Corriente de C.C. F-T inicial (kA)
CCMU1	1,63	5,895	1,51	5,431
CCMU2	1,63	5,894	1,51	5,431

Fuente: Elaboración propia

Como se puede observar en la simulación se presenta la diferencia entre el esquema actual y el nuevo, el resultado de corriente de cortocircuito tanto trifásica como fase tierra se encuentran en niveles tolerables con respecto a las barras de 480V, que son capaces de soportar hasta una corriente de cortocircuito de 25kA, el estudio demuestra que es viable aplicar la alternativa planteada ya que los niveles de corriente en los tableros están significativamente por debajo de la corriente nominal.



CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Un análisis muy importante en centrales de generación de energía eléctrica es la selección de un esquema de barras de las fuentes de alimentación para los Servicios Auxiliares, ya que, dependería de ello para su óptima operación en la central.

Conclusiones

1. Se ha planteado el estudio de dos alternativas con la mayor factibilidad en cuanto al grado de confiabilidad y el menor impacto posible al sistema de alimentación de auxiliares implantado actualmente.
2. Se realizó el estudio de variaciones de tensión en los distintos tableros de la central, determinando altos picos de tensión, variaciones bruscas dv/dt y niveles bajos de tensión causados por la transferencia de fuentes, los cuales perjudican el correcto funcionamiento de elementos esenciales como: cargadores de batería, inversores, ascensor, etc.
3. Para disminuir el costo de implementación de estas alternativas se logró realizar la menor cantidad de inversiones reutilizando los equipos existentes.
4. El estudio realizado de confiabilidad permite garantizar la alimentación continua desde la central Molino, el menor índice de falla lo tiene los auto-transformadores alimentados desde el sistema nacional (promedio de 0.09 fallas/año), la línea Molino 1 es la que presenta una mayor tasa de fallos con 1.25 fallos/año que relativamente es baja, el estudio de confiabilidad se



realizó tomando en cuenta la base de datos del departamento de mantenimiento.

Como el punto de análisis es en Mazar, existen muchos caminos por los cuales el suministro puede llegar a la central, así el estudio de confiabilidad del sistema completo Molino-Presa-Mazar, presenta una disponibilidad actual de 0,99165393, debido a que el circuito Molino Presa 2 se encuentra indisponible, lo que afecta notablemente en su valor, pero si el problema logra solucionarse este incrementa a 0,99991349 resultando un sistema con muy alta confiabilidad.

5. En la Alternativa N°1 *Alimentación desde otra central*, se logró disminuir el número de transferencia de fuentes y la colocación de los nuevos TAGMx mejoró el nivel de tensión de las líneas de Molino.
6. En la Alternativa N°2 *Auto – alimentación para cargas esenciales*, se logró disminuir el número de transferencias en el TDSM. Con la reubicación e instalación de los TAGx se mejoró el nivel de tensión de las líneas de Molino. La instalación de los nuevos TSAUx no presentan mayores cambios en el estudio de cortocircuitos y la confiabilidad del sistema mejora notablemente, resultando la mejor alternativa como fuente confiable.



Recomendaciones

Para la alternativa N°1 *Alimentación desde otra central* se debe considerar:

1. El dimensionamiento de los TAGMx y tipo de conexionado en base a la potencia de las líneas de Molino y el TDSM. Los intercambiadores de TAP deberán ser automáticos y maniobrados bajo carga.
2. Además definir un lugar de ubicación para los nuevos TAGMx cerca de la torre de llegada de las líneas de Molino y el TDSM. Considerar lugar adecuado para mantenimiento, ruido, vibraciones, humedad, etc.
3. Utilizar bandejas disponibles para los conexionados, con el fin de garantizar seguridad al personal del Edificio de Servicios.
4. Realizar pruebas frecuentes del funcionamiento del Generador de Emergencia, para garantizar seguridad como fuente confiable.

En la segunda alternativa *Auto – alimentación para cargas esenciales*

1. Al eliminar la alimentación de los TAGx en el Centro de Fuerza, se podrían reutilizar para regular el nivel de tensión de las líneas de Molino. Cambiar nomenclatura de TAG1 y TAG2 hacia TAGM1 y TAGM2 respectivamente.
2. Aprovechando la ubicación actual de los TAGx de las unidades y su proximidad al TDSM se podría realizar el conexionado con una distancia que no excedería los 100 metros, sin ningún problema.
3. Considerar el dimensionamiento de los nuevos transformadores TSAU1 y TSAU2 (13.8/0.480Kv) con una potencia ligeramente superior a la carga de los CCMU1 y CCMU2 respectivamente. En la simulación del estudio de cortocircuitos se utilizó una potencia de 300kVA para cada



transformador, lo que garantiza una corriente de corriente de cortocircuito tolerable.

4. Definir lugar de ubicación para los nuevos transformadores TSAU1 y TSAU2, cercano a los RLC1 y RLC2 con respecto a los tableros CCMU1 y CCMU2, Considerar lugar adecuado para mantenimiento, ruido, vibraciones, humedad, etc.
5. En todos los esquemas lógicos suprimir la dependencia de los TAGx en el Centro de Fuerza, de esta manera se garantiza una alimentación ininterrumpida desde Molino para todos los tableros de la central.
6. Con respecto a la segunda alternativa, en caso de presentarse una falla permanente en la alimentación mediante las líneas LMx provenientes de Molino, proceder al re-conexionado de uno de los interruptores 52-TAGx proveniente de las unidades para alimentar todos los auxiliares de la central.



BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS:

- [1] Energía Hidroeléctrica - José Francisco Sanz Osorio – Prensas Universitarias de Zaragoza, 2008.
- [2] North American Electric Reliability Council, NERC.
- [3] GUIA DE DISEÑO Y NORMAS DEL SISTEMA DE SERVICIOS AUXILIARES-Transener S.A.
- [4] Centrales Hidráulicas-Ismael Suescún Monsalve
- [5] Mantenimiento de Servicios Auxiliares de una Central Hidroeléctrica – Hernández Reyes Pedro Luis.
- [6] Terán Edmundo; Selección y protección de esquema de barras en subestaciones 230/138 kv.; Tesis de Grado-E.P.N.-1978
- [7] American Institute of electrical engineers; Tertiary Windings in Autotransformers, Power Apparatus and Systems.
- [8] Guía de diseño de instalaciones eléctricas- Schneider Electric
- [9] Research on The Cost Analysis System of Hydropower Ancillary Services Based on LabVIEW IEEE.
- [10] Tesis: optimización de la operación de la cuenca del laja mediante automatización de los servicios auxiliares-Gonzalo Andrés Solís Alarcón.
- [11] CELEC E.P. HIDROPAUTE -Planos de construcción e información técnica



- [12] Especificación técnica centro de carga de media tensión – 13,8KV - TDSM descripción del sistema-compañía de Generación Hidroeléctrica Paute – Celec EP Hidropaute.
- [13] Centrales Eléctricas – Ángel Luis Orille Fernández – Universidad Politécnica de Cataluña - septiembre de 1993.
- [14] IEC 60038 - IEC standard voltages INTERNATIONAL STANDARD - Edition 7.0 2009-06.
- [15] American National Standard For Electric Power Systems and Equipment— Voltage Ratings (60 Hertz), Approved December 6, 2006.
- [16] Central hidroeléctrica Paute Mazar estudio de selectividad y coordinación de protecciones - Servicios Auxiliares de media y baja tensión.
- [17] Análisis para el Inicio del Restablecimiento de la Zona 4 del S.N.I. posterior a un “Black-out” considerando el Arranque en Negro de las Unidades de la Central Mazar. M. A. Maldonado - V.A. Llivichuzhca.
- [18] EE13 - Especificación técnica sistema de servicios auxiliares c.a. tableros de 13,8 kV y 480 V, 60 hz Proyecto Hidroeléctrico Sopladora.
- [19] Tesis - Selección del esquema de barras para los Servicios Auxiliares de centrales de generación. Roberto Barba Barba; Quito; agosto de 1996.
- [20] Criterios de diseño ALSTOM VOITH SIEMENS primera emisión.
- [21] Guía técnica de aplicación – cálculo de caídas de tensión. Edición: sep03. Ministerio de Ciencia y Tecnología.
- [22] Confiabilidad de sistemas eléctricos Schneider – Electric. Juan Carlos Orjuela.



- [23] Reliability Evaluation of Power Systems – Second Edition, Roy Bilinton and Ronald N. Allan.
- [24] Evaluación mediante enumeración de estados de la confiabilidad del Sistema Interconectado del Norte Grande de Chile (SING) Víctor Fuentes Morales - Osman Duarte Moya.
- [25] Confiabilidad de un Sistema Eléctrico de Potencia María Cristina Álvarez - Alicia Wilson - Enzo Coppes.
- [26] Confiabilidad en Ingeniería - Carlos J. Zapata.
- [27] Sistemas de Distribución Eléctrica - Modesto Salgado Rodríguez.
- [28] Análisis de Sistemas de Potencia - John Grainger & William Stevenson
- [29] Francisco M. Gonzalez - Longatt, Abril, 2006
- [30] Cálculo de cortocircuito en los Sistemas Eléctricos de Potencia - Dr. Héctor Silvio Llamo Laborí.